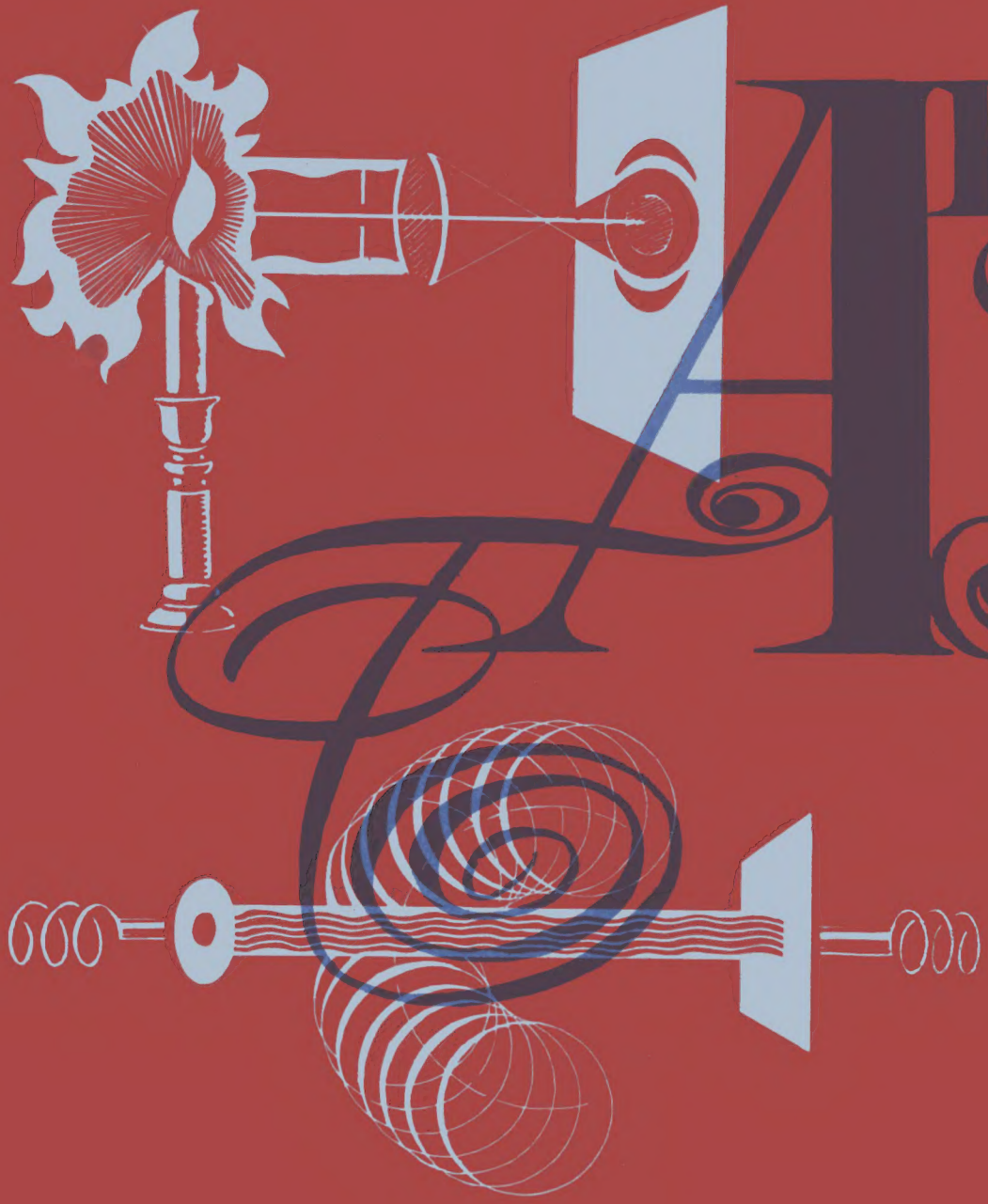
ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ЮНОГО ФИЗИКА

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ЮНОГО ФИЗИКА



АБВГДЕ

А
Б
В
Г
Д
Е
Ж
З
И
К
Л
М
Н
О
П
Р
С
Т
У
Ф
Ц
Ч
Э
Я

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ЮНОГО ФИЗИКА

МОСКВА
«ПЕДАГОГИКА»
1984

Редакционная коллегия:
МИГДАЛ А. Б. (главный редактор)
АСЛАМАЗОВ Л. Г.
(заместитель главного редактора)
ВАСИЛЬЕВ Ю. В.
ВОЗДВИЖЕНСКИЙ Б. В.
ГОЛЬДАНСКИЙ В. И.
КАПИЦА С. П.
ЛЕШКОВЦЕВ В. А.
ОСИПЯН Ю. А.
ПЕТРЯНОВ И. В.
ТРИФОНОВ Д. Н.
ФАБРИКАНТ В. А.
ХЕЛЕМЕНДИК В. С.
ШКОНДИН В. В.

Составитель
ЧУЯНОВ В. А.

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ЮНОГО ФИЗИКА

ДЛЯ
СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО
ШКОЛЬНОГО
ВОЗРАСТА

Библиотечная серия

ББК 22.3я2
Э61

Энциклопедический словарь юного физика/
Э61 Сост. В. А. Чуянов. — М.: Педагогика, 1984.—
352 с., ил.

Словарь дает ответы на многие вопросы из области физической науки, рассказывает о ее развитии и современных проблемах, о роли физики в научно-техническом прогрессе человечества

Книга содержит сведения о жизни и деятельности ученых, внесших значительный вклад в развитие науки.

Одна из задач словаря — помочь учащимся в выборе профессии. В словаре даются практические советы юным физикам.

Для школьников среднего и старшего возраста.

Э $\frac{4306000000 - 079}{005(01) - 84}$ 56 — 84 ББК 22.3я2

© Издательство «Педагогика», 1984 г.

К НАШИМ ЧИТАТЕЛЯМ

Эта книга адресована всем, кто интересуется физикой. В наше время знание основ физики необходимо каждому, чтобы иметь правильное представление об окружающем мире — от свойств элементарных частиц до эволюции Вселенной.

Словарь будет полезен вам при изучении физики в школе и при чтении научно-популярных книг или статей. Тем же, кто решил избрать физику своей профессией, словарь поможет укрепиться в этом решении, сделать первые шаги на пути к овладению профессией.

Что может быть важнее выбора профессии? Найти любимое дело — значит не только приносить пользу обществу, но и постоянно испытывать чувство внутреннего удовлетворения.

Одна из главных задач этой книги — помочь молодому человеку, который заинтересовался физикой, лучше понять, что представляет собой эта наука и подходит ли она ему по его склонностям и способностям.

Но и тем, кто изберет другую профессию, знание физики принесет пользу. Вы узнаете из словаря, как даже абстрактные на первый взгляд физические исследования рождали новые области техники, давали толчок развитию промышленности и привели к тому, что принято называть научно-технической революцией. Успехи ядерной физики, теории твердого тела, электродинамики, статистической физики, квантовой механики определили облик техники конца *XX* в., такие ее направления, как лазерная техника, ядерная энергетика, электроника. Разве можно представить себе в наше время какие-нибудь области науки и техники без электронных вычислительных машин? Автоматический отбор научных наблюдений, автоматизация производства и управления и даже лингвистический анализ литературных произведений делаются с помощью ЭВМ.

Многим из вас после окончания школы доведется работать в одной из этих областей, и кем бы вы ни стали — квалифицированными рабочими, лаборантами, техниками, инженерами, врачами, космонавтами, биологами, археологами, — знание физики поможет вам лучше овладеть своей профессией.

Но вернемся к физике. Физические явления исследуются двумя способами: теоретически и экспериментально. В первом случае (*теоретическая физика*) выводят новые соотношения, пользуясь математическим аппаратом и основываясь на известных ранее законах физики. Здесь главные инструменты — бумага и карандаш. Во втором случае (*экспериментальная физика*) получают новые связи между явлениями с помощью физических измерений. Здесь инструменты гораздо разнообразнее — многочисленные измерительные приборы, ускорители, пузырьковые камеры и т. д.

Естественно, что эти два подхода требуют различного склада ума и разных способностей, которые редко совмещаются в одном человеке. Кроме того, можно заниматься физикой как наукой или физикой, которая подготавливает почву для практических применений. Так, электромагнитные волны сначала были обнаружены английским ученым Дж. Максвеллом теоретически, как следствие полученных им уравнений электродинамики. Затем они были открыты на опыте немецким физиком Г. Герцем. После этого русский ученый А. С. Попов и итальянский инженер Г. Маркони показали возможность использования этого физического явления в практических целях, выступив как представители прикладной физики. Эти работы были продолжены многими другими теоретиками и экспериментаторами. Ими были развиты физические принципы современных передатчиков и приемников. И, наконец, реальное завершение радиосвязь получила, перейдя из области прикладной физики в область техники.

Какую из многочисленных областей физики предпочесть? Все они тесно связаны между собой. Нельзя быть хорошим экспериментатором или теоретиком в области, скажем, физики высоких энергий, не зная физики низких температур или физики твердого тела. Новые методы и соотношения, появившиеся в одной области, часто дают толчок в понимании другого, на первый взгляд далекого раздела физики. Так, теоретические методы, развитые в квантовой теории поля, произвели революцию в теории фазовых переходов, и наоборот, например, явление спонтанного нарушения симметрии, хорошо известное в классической физике, было заново «открыто» в теории элементарных частиц и совершенно изменило даже самый подход к этой теории. И, разумеется, прежде чем окончательно выбрать какое-либо направление, нужно достаточно хорошо изучить все области физики.

Кроме того, время от времени по разным причинам приходится переходить из одной области в другую. Особенно это относится к физикам-теоретикам, которые не связаны в своей работе с громоздкой аппаратурой.

Большинству физиков-теоретиков приходится работать в различных областях: атомная физика, космические лучи, теория металлов, атомное ядро, квантовая теория поля, астрофизика — все разделы физики интересны. Сейчас наиболее принципиальные проблемы решаются в теории элементарных частиц и в квантовой теории поля. Но и в других областях физики есть много интересных нерешенных задач. И, конечно, их очень много в прикладной физике.

Эта книга поможет вам не только ближе познакомиться с различными разделами физики, но, главное, почувствовать их взаимосвязь.

Очень важно при чтении подкреплять свои мысли или догадки вычислениями. Для этого нужно знать, хотя бы приближенно, все важные физические константы, все главные соотношения.

Нужно научиться делать оценки величин и соотношений. Вот примеры: 1. Оцените расстояние до Луны. (Это легко сделать, зная ускорение силы тяжести и период обращения Луны.) 2. Какую максимальную скорость может приобрести парашютист в затяжном прыжке? С какой скоростью падают капли дождя? (Здесь нужно знать вязкость и плотность воздуха и мысленно заменить парашютиста шаром с радиусом, например, 1 м. Проверьте, какой режим в этом случае выполняется — вязкий или турбулентный.) 3. Сравните теплоотдачу свечи, электрической плитки и человека. 4. С какой средней скоростью движутся электроны в проводнике при плотности тока, скажем, ампер/см^2? 5. Какая энергия падает на Землю в виде космических лучей?

Как только вы хотя бы немного научитесь таким оценкам, вы сможете быстро проверять разумность той или иной идеи.

Для того чтобы заниматься наукой, надо не только много знать и уметь, но и воспитать в себе определенные качества характера. Вот несколько советов.

Старайтесь читать научно-популярные статьи и книги активно, пытаясь решать поставленные в них задачи до того, как прочтете их решение.

Не старайтесь с самого начала все понимать до конца. Понимание приходит постепенно, в результате упорного труда, по мере привыкания к новым понятиям. Настоящее глубокое понимание обязательно приводит к новым результатам, но приходит оно только после того, как хорошенько поработаешь в данной области.

Если придет в голову идея, надо не только стараться ее подтвердить, но в еще большей степени стараться ее опровергнуть. Только так можно научиться добросовестно и объективно думать.

Главной движущей силой должен быть интерес к делу, а не стремление к эффектным результатам. Я знаю немало примеров, когда талантливые люди теряли способность добросовестно работать из-за стремления во что бы то ни стало сделать мировое открытие.

Задача научного работника — упорное и добросовестное исследование интересующего его явления, когда каждый малый шаг приносит радость. Открытие приходит только как побочный продукт такого исследования.

От идеи, даже самой хорошей, до достоверной научной истины — тяжелый и трудный путь, идущий через сомнения и догадки, через провалы и взлеты, подобно восхождению на непокоренную вершину, с которой открываются новые горизонты.

Физике посвящены тысячи томов научной и научно-популярной литературы. Все это в одну книгу вместить нельзя. Авторы словаря постарались отобрать самое существенное и ответить на основные вопросы, которые могут возникнуть у любознательных читателей. Вы не найдете здесь некоторых понятий и терминов, которые хорошо известны вам из школьного курса. Главное внимание уделено физике XX в.

В словаре около двухсот статей, расположенных в алфавитном порядке. Атом и ядро, акустика, механика, оптика, плазма, твердое тело, теория относительности, термодинамика, элементарные частицы — об этих и других разделах физической науки рассказывается в этой книге.

Вы встретите здесь имена многих выдающихся ученых нашей страны и других стран мира. Им посвящено около сорока статей, помещенных рядом со статьями о тех областях науки, которыми они занимались.

В книге описаны интересные физические опыты; их можно проделать самостоятельно в школьной лаборатории или даже дома.

Чтобы найти нужную статью, пользуйтесь алфавитным указателем в конце книги. Там же находится список рекомендуемой литературы.

Если слово в статье набрано *курсивом*, значит, в словаре есть отдельная статья с таким же названием.

Авторы, работавшие над Энциклопедическим словарем юного физика, надеются, что он станет настольной книгой для всех, кто интересуется физикой.

Академик
А. Б. МИГДАЛ

А

АВОГАДРО ЗАКОН И ЧИСЛО

Итальянский физик и химик Амедео Авогадро (1776—1856) родился в Турине. Он получил юридическое образование. Но интерес и склонность к естественным наукам побудили его заняться самостоятельным изучением физики и математики. В 1806 г. он начинает преподавать физику в университетском лицее в Турине, а в 1820 г. становится профессором математической физики в Туринском университете.

Научные работы Авогадро посвящены различным областям физики и химии. В 1811 г. ученый высказал гипотезу, согласно которой *молекулы* простых *газов* состоят из одного или нескольких *атомов*. На ее основе он сформулировал один из основных законов идеальных газов, получивший название *закона Авогадро*. Этот закон гласит: «В равных объемах любых газов при одинаковых условиях содержится одинаковое число молекул». (Под одинаковыми условиями имеются в виду температура и давление.) Закон Авогадро послужил одной из основ, на которой в дальнейшем стало развиваться атомно-молекулярное учение.

Из этого закона следует, что плотности газов, измеренные при одинаковых внешних условиях, относятся как их молярные *массы*. Если принять произвольно молярную массу какого-либо газа за единицу (обычно 1/12 массы моля углерода), то можно, зная плотности газов, вычислять их относительные молярные массы.

Впоследствии один из основоположников физической химии — нидерландский ученый Я. Вант-Гофф распространил законы идеальных газов на разбавленные растворы, исходя из следующей аналогии: «Растворенное вещество распространяется по всему объему растворителя, подобно тому как газ распространяется по пустому пространству, занимая весь объем».

Вант-Гофф показал, что, подобно тому как газ оказывает давление на стенки сосуда, где он находится, растворенное вещество вызывает специфическое давление, которое ученый назвал осмотическим. О с м о т и ч е с к о е д а в л е н и е равно давлению газа, которое наблюдалось бы, если бы мы удалили растворитель, а растворенное вещество заполнило бы тот же объем в виде газа. Таким образом, измеряя осмотическое давление данного вещества в каком-либо растворителе, можно узнать плотность этого вещества в газообразном состоянии и вычислить при помощи закона Авогадро его молекулярную массу. Так удалось определить молекулярные массы веществ, которые трудно или невозможно получить в газообразном состоянии, например сахара.

М о л е м называют количество данного вещества, содержащее столько же молекул, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода. Тогда закон Авогадро можно сформулировать еще и так: «Моль любого вещества содержит одно и то же число молекул». Это число получило название *числа Авогадро*. Оно равно $6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Число Авогадро определяют различными методами, некоторые из них основаны на изучении *броуновского движения*. Вторая формулировка закона Авогадро справедлива не только для *газов*, но и для *жидкостей* и *твердых тел*.

Знание числа Авогадро дает представление о масштабах микромира, о размерах молекул. Возьмем 1 см^3 воды; его масса 1 г, что составляет $^1/_{18}$ моля воды; следовательно, 1 см^3 воды содержит $\frac{6{,}02}{18} \cdot 10^{23} = 3{,}34 \cdot 10^{22}$ молекул воды. Стало быть, на долю одной молекулы приходится объем $\frac{1}{3{,}34 \cdot 10^{22}} = 3 \cdot 10^{-23}$см^3 $= 3 \cdot 10^{-29}$м^3. Считая, что в жидкости молекулы плотно прилегают друг к другу, найдем, что линейный размер молекулы, т. е. величина порядка корня кубического из ее объема, составляет около $3 \cdot 10^{-10}$м, или 0,3 нм.

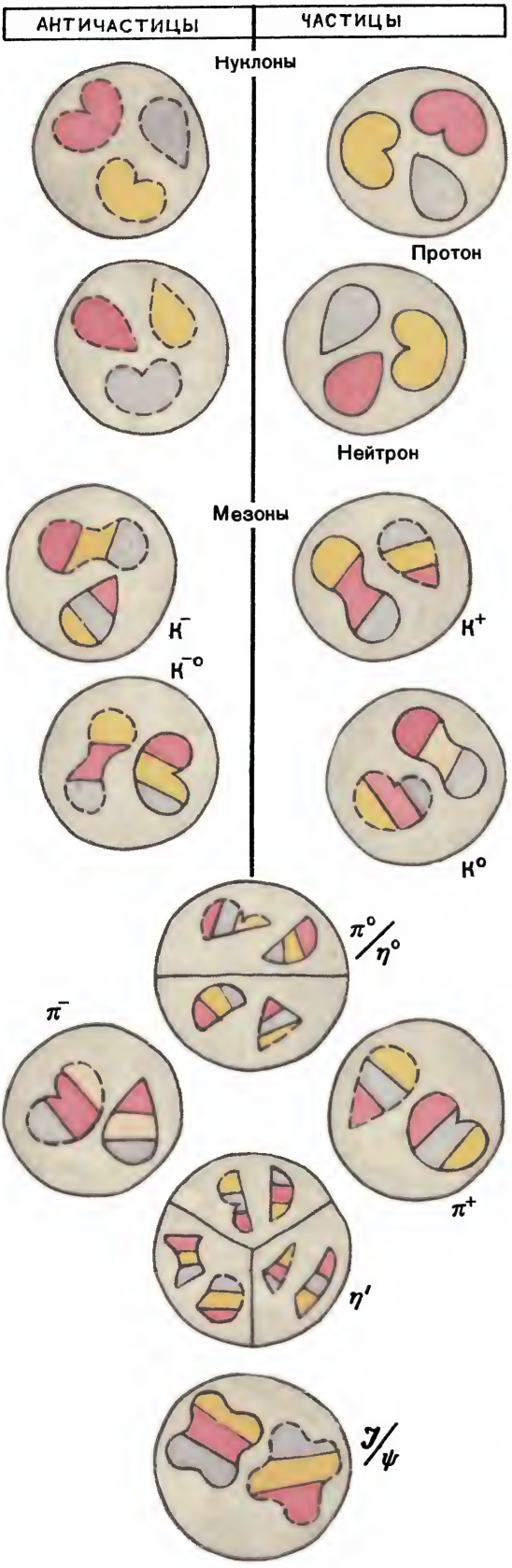
Линейные размеры других *атомов* и *молекул* также величины порядка десятых долей нанометра. Наименьшие частицы, доступные наблюдению в оптическом микроскопе, имеют размеры в несколько десятых микрометра, т. е. они содержат около 10 млрд. атомов. Однако с помощью электронного микроскопа и некоторых других приборов (например, ионного проектора) можно наблюдать отдельные атомы.

АДРОНЫ

Адроны — общее название для частиц, участвующих в *сильных взаимодействиях*. Название происходит от греческого слова, означающего «сильный, крупный». Все адроны делятся на две большие группы — м е з о н ы и б а р и о н ы.

Б а р и о н ы (от греческого слова, означающего «тяжелый») — это адроны с полуцелым спином (см. *Спин*). Самые известные барионы — *протон* и *нейтрон*. К барионам при-

Наиболее известные адроны.

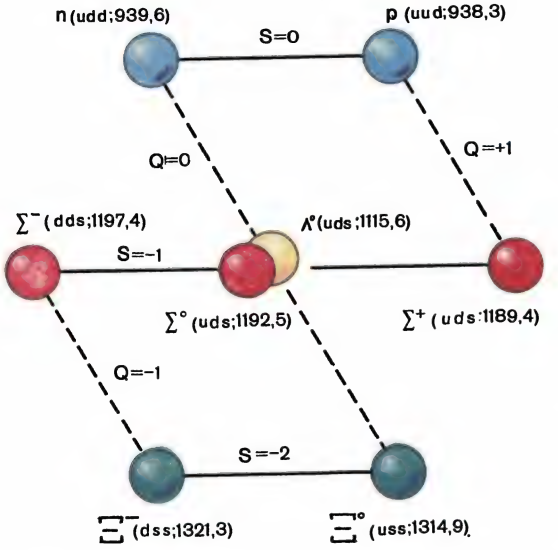


надлежит также ряд частиц с квантовым числом, названным когда-то странностью. Единицей странности обладают барион лямбда (Λ^0) и семейство барионов сигма (Σ^-, Σ^+ и Σ^0). Индексы +, —, 0 указывают на знак электрического заряда или нейтральность частицы. Двумя единицами странности обладают барионы кси (Ξ^- и Ξ^0). Барион Ω^- имеет странность, равную трем. Массы перечисленных барионов примерно в полтора раза больше массы *протона*, а их характерное время жизни составляет около 10^{-10} с. Напомним, что протон практически стабилен, а *нейтрон* живет более 15 мин. Казалось бы, более тяжелые барионы очень недолговечны, но по масштабам микромира это не так. Такая частица, даже двигаясь относительно медленно, со скоростью, скажем, равной 10% от световой, успевает пройти путь в несколько миллиметров и оставить свой след в детекторе элементарных частиц (см. *Детекторы ядерных излучений*). Одним из свойств барионов, отличающих их от других видов частиц, можно считать наличие у них сохраняющегося барионного заряда. Эта величина введена для описания опытного факта постоянства во всех известных процессах разности между числом барионов и антибарионов (см. *Четность*, *Лептоны*, *Протон*).

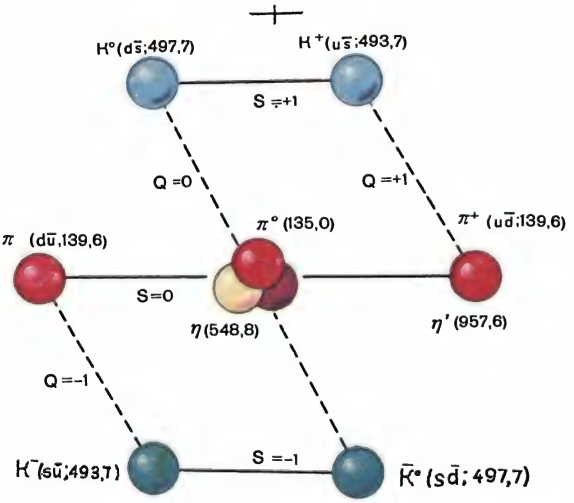
Мезоны — адроны с целым спином. Название произошло от греческого слова, означающего «средний», поскольку массы первых открытых мезонов имели промежуточные значения между массами *протона* и *электрона*. Барионный заряд мезонов равен нулю. Легчайшие из мезонов — пионы, или пи-мезоны π^-, π^+ и π^0. Их массы примерно в 6—7 раз меньше массы протона. Более массивны странные мезоны — каоны K^+, K^- и K^0: их массы почти в два раза меньше массы протона. Характерное время жизни этих мезонов — 10^{-8} с.

Почти все адроны имеют античастицы. Так, барион сигма—минус Σ^- имеет античастицу антисигма—плюс $\bar{\Sigma}^+$, которая отлична от Σ^+. То же самое можно сказать и о других барионах. С мезонами дело обстоит несколько иначе: отрицательный пион — античастица положительного пиона, а нейтральный пион античастицы вообще не имеет, поскольку является античастицей сам себе. В то же время нейтральный каон K^0 имеет античастицу $\bar{K}^0$. Эти факты получают объяснение в кварковой модели адронов (см. *Кварки*).

Мир адронов огромен — он включает более 350 частиц. Большинство их очень нестабильны: они распадаются на более легкие адроны за время порядка 10^{-23}с. Это — характерное время сильных взаимодействий; за столь короткий интервал даже свет успевает пройти расстояние, равное всего лишь радиусу протона (10^{-13} см). Ясно, что столь короткоживущие частицы не могут оставить следов в детек-



Восьмерка барионов со спином 1/2. Одинаковый цвет указывает на близость свойств соответствующих частиц. Сплошными линиями соединены барионы с одинаковыми значениями странности S, пунктиром — с одинаковыми значениями электрического заряда Q. В скобках приведен кварковый состав барионов и их масса в МэВ/c^2.



Девятка мезонов со спином 0. Мезоны с нулевыми значениями странности и электрического заряда (η^0, η и η^1) состоят из кварк-антикварковых пар $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ и $s\bar{s}$, смешанных в разных пропорциях.

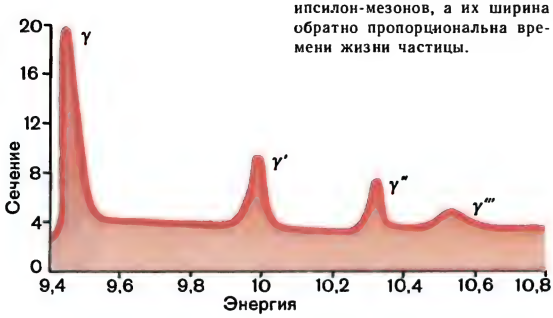
торах. Обычно их рождение обнаруживают по косвенным признакам. Например, изучают реакцию аннигиляции электронов и позитронов с последующим рождением адронов. Изменяя энергию столкновения электронов и позитронов, обнаруживают, что при каком-то значении энергии выход адронов вдруг резко увеличивается. Данный факт можно объяснить тем, что в промежуточном состоянии родилась частица, масса которой равна соответствующей энергии (с точностью до множителя c^2). Эта частица мгновенно распадется на другие адроны, и единственным следом ее появления останется пик на графике зависимости вероятности рождения адронов от энергии столкновения. Такие короткоживущие частицы называют резонансами. Большинство барионов и мезонов — резонансы. Они не оставляют «автографов» в камерах и на фотографиях, и все же физикам удается изучать их свойства: определять массу, время жизни, спин, четность, способы распада и т. п.

По современным представлениям адроны не являются истинно *элементарными частицами*. Они имеют конечные размеры и сложную структуру. Барионы состоят из трех кварков. Соответственно антибарион состоит из трех антикварков и всегда отличен от бариона. Мезоны построены из кварка и антикварка. Ясно, что мезоны, в состав которых входят пары из кварков и антикварков одного сорта, не будут иметь античастиц. Кварки удерживаются внутри адронов глюонным полем (см. *Сильные взаимодействия*). В принципе теория допускает существование других адронов, построенных из большего числа кварков или, наоборот, из одного глюонного поля. В последнее время появились некоторые экспериментальные данные о возможном существовании таких гипотетических частиц.

Динамическая теория кварков, описывающая их взаимодействия, стала развиваться относительно недавно. Первоначально кварковая модель была предложена для «наведения порядка» в слишком многочисленном семействе адронов. Эта модель включала кварки трех видов, или, как принято говорить, ароматов. С помощью кварков удалось навести порядок в многочисленном семействе адронов, распределив их в группы частиц, называемые мультиплетами. Частицы одного мультиплета имеют близкие массы, но не только это послужило основой их классификации; кроме опытных данных в этом случае использовали специальный математический аппарат теории групп.

В дальнейшем оказалось, что трех кварковых ароматов недостаточно для описания всех адронов. В 1974 г. были открыты так называемые пси-мезоны, состоящие из кварка и антикварка нового вида ($c\bar{c}$). Этот аромат был назван очарованием. Новый очарованный кварк c оказался гораздо тяжелее своих «собратьев»: легчайшая из пси-частиц — мезон J/ψ — имеет массу 3097 МэВ, т. е. в 3 раза тяжелее протона. Время ее жизни около 10^{-20}с. Было открыто целое семейство пси-мезонов с тем же кварковым составом $c\bar{c}$, но находящихся в возбужденных состояниях и вследствие этого имеющих большие массы. Было очевидно, что должны существовать и связанные состояния c-кварка с кварками других ароматов. В такого рода частицах «очарование» c-кварка не будет компенсироваться «антиочарованием» $\bar{c}$-кварка, как это происходит в пси-мезонах. Поэтому такие частицы получили название очарованных мезонов. Сейчас почти

Четыре ипсилон-мезона. Кривые изображают зависимость сечения (вероятности) процесса аннигиляции ($e^- + e^+ \to$ адроны) от энергии в системе центра масс сталкивающихся электронов и позитронов. Сечение измеряется в нанобарнах: 1 барн $= 10^{-24}$ см^2, а энергия — в ГэВ. Положение пиков определяется массами ипсилон-мезонов, а их ширина обратно пропорциональна времени жизни частицы.



все они уже открыты. Упомянем для примера очарованный странный мезон F^+ с кварковым составом $c\tilde{s}$, имеющий массу 2021 МэВ. Теория предсказывает также существование около 20 очарованных барионов, некоторые из них уже найдены в опытах, например барион Λ_c^+ с составом $\tilde{c}ud$ и массой 2282 МэВ.

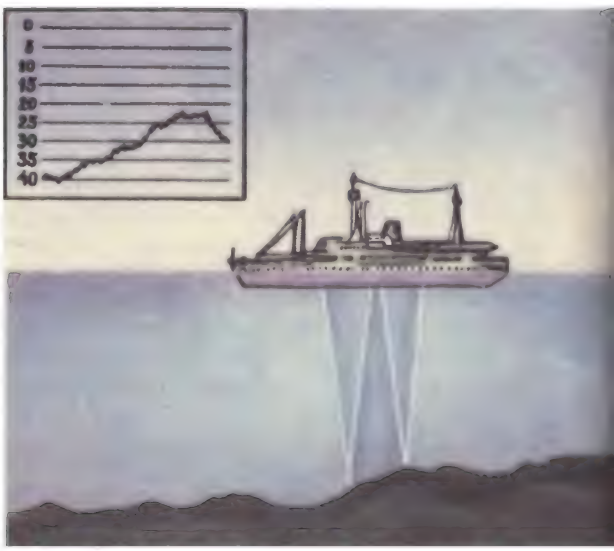
Существование очарованного кварка было предсказано теоретиками, поскольку выяснилось, что кварки должны встречаться парами, дублетами. Неожиданно оказалось, что природа не ограничилась двумя кварковыми дублетами. В 1977 г. были открыты ипсилон-мезоны, состоящие из кварка и антикварка пятого вида b. Новый аромат получил название прелесть. Прелестные кварки еще более массивны, чем очарованные. Масса первой из ипсилон-мезонов частицы Y составляет 9456 МэВ. Это самая легкая частица из семейства ипсилонов (сейчас известны четыре частицы этого семейства с кварковым составом $b\tilde{b}$), но и она в 10 раз (!) тяжелее протона. В самое последнее время стало известно об открытии прелестных мезонов, в которых b-кварк соединен с антикварком другого аромата; например, B^--мезон имеет состав $b\tilde{u}$. Масса прелестных мезонов порядка 5274 МэВ. Ожидается, что b-кварк также образует кварковый дублет с еще более массивным t-кварком, пока еще не обнаруженным экспериментально.

АКУСТИКА

Акустика — раздел физики, изучающий *звук* и его взаимодействие с веществом. В повседневной жизни это слово употребляется чаще всего в значении звуковой характеристики какого-либо помещения. О хорошей акустике театрального зала говорят, если голоса артистов ясно слышны в любом уголке, если они доходят до слушателей естественными, неискаженными. Достичь этого очень непросто. Многократно отражаясь в помещении от стен и предметов, звуковые волны могут создавать многоголосое эхо. Оно как бы блуждает по залу, постепенно затухая. Это явление называют реверберацией. От времени реверберации во многом зависит акустика помещения. Если это время велико, звуки долго не затухают, накладываются один на другой, и в зале возникает сплошная путаница голосов. Ничуть не лучше, когда время реверберации слишком мало. Стены быстро поглощают звуковые волны, и голоса делаются глухими, тембр их сильно искажается. И здесь нужно отыскать своего рода золотую середину. Этим и занимается архитектурная акустика, данные которой используют при проектировании, например, театральных и лекционных залов, зданий железнодорожных и аэровокзалов. Иная задача у строительной акустики. Она изучает распространение звуковых волн на территории городских кварталов, заводских цехов, внутри помещений и ищет способы защиты людей от шума.

Но вернемся к основному определению акустики. Оно чрезвычайно емко и охватывает множество разнообразных областей исследования и практического применения. К примеру, изучение звука и его взаимодействия с веществом привело к созданию устройств для дробления крепких горных пород и своеобразного «просвечивания» бетонной плиты или стального рельса, обеспечило «зрение» подводным судам, оно становится необходимым при конструировании самолетов, открывает новые возможности ускорять химические реакции, быстрее и полнее извлекать нефть из недр земли.

Запись рельефа дна с использованием ультразвука.



Тысячи лет назад строили театры, учитывая требования архитектурной акустики. Схема расположения голосников в большом театре (из книги римского архитектора I в. до н. э. Витрувия).

Звук распространяется в *газах*, *жидкостях*, *твердых телах* в виде чередующихся сжатий и растяжений. Вещество на пути прохождения звуковой волны то сжимается, то растягивается, испытывает, как говорят специалисты, воздействие знакопеременных нагрузок. При определенных условиях такая встряска может стать разрушительной даже для крепкой горной породы. Недавно подобным механическим воздействием звука воспользовались нефтедобытчики. Время от времени доступ нефти к устью скважины может забиваться кусочками глины, песчаника, образующими вместе довольно прочную пробку. Для разрушения ее в скважину спускают мощный источник звука.

В жидкостях под действием интенсивного ультразвука возникают сильные пульсации давления. Этот эффект используют для измельчения взвешенных в жидкости частиц, перемешивания жидкостей, ускорения химических реакций — поскольку в зоне резкого скачка давления молекулы реагентов сближаются друг с другом.

Скорость распространения звуковых волн зависит от свойств окружающей среды: в воде они бегут быстрее, чем в воздухе; в твердых телах — быстрее, чем в воде. А переход их из среды с одной плотностью в среду с другой плотностью сопровождается отражением и преломлением на границе раздела сред. Эти свойства легли в основу создания своеобразных «органов зрения» для невидимого обычному глазу. Так, звуковые волны низкой частоты легко проходят сквозь всю толщу Земли. Измеряя скорость распространения их в различных земных толщах, ученые исследуют внутреннее строение нашей планеты. Известно, что, крикнув в сторону леса или крутой горы и определив

время до прихода эха, можно довольно точно вычислить расстояние до них. Для этого надо умножить половину времени на скорость звука в воздухе. Аналогично действует прибор для подводного видения — гидролокатор, принимающий эхо от ультразвукового сигнала. С помощью гидролокатора измеряют глубину моря, определяют расстояние до препятствий, например до айсбергов при плавании в высоких широтах. Своеобразный ультразвуковой локатор используют и для обнаружения внутренних дефектов металла, бетона. Если внутри образца материала есть инородные вкрапления, пустоты или трещины, ультразвуковые волны отражаются от них, как от препятствия.

Акустика сегодня все шире раскрывает свои богатейшие возможности. Так, ультразвук помогает разогревать до миллионов градусов плазму в экспериментальных термоядерных установках, а недавно ученые открыли чрезвычайно важную для авиации и других областей науки и техники удивительную способность звуковых волн — управлять течением газов и жидкостей, делать это течение вихревым, турбулентным или, напротив, превращать его в спокойное, ламинарное (см. *Турбулентность*).

АЛЬФА-РАСПАД

История открытия и изучения α-распада связана с именем Э. Резерфорда. Он предложил и названия: α-распад, α-частица. Это произошло вскоре после открытия *радиоактивности*, когда Резерфорд только начал заниматься исследованием излучения солей урана. Опыты показали, что это излучение неоднородно. Одна его часть поглощалась тонкой алюминиевой фольгой, тогда как другая свободно проходила сквозь нее. Ученый назвал их соответственно α- и β-лучами. Немного позднее была обнаружена еще одна составная часть излучения, обозначенная третьей буквой греческого алфавита: γ-лучи (см. *Бета-распад*, *Гамма-излучение*).

На долгие годы α-частицы стали для Резерфорда незаменимым инструментом исследования *атомных ядер* (см. *Атом*). Ему принадлежит и первенство в выяснении природы α-частиц. Оказалось, что это — атомы гелия, потерявшие два *электрона* — ядра атома гелия-4.

$$\alpha \equiv {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Ядро гелия-4, состоящее из двух *протонов* и двух *нейтронов*, одно из самых простых и устойчивых. Частицы связаны в нем так прочно, что многим другим ядрам было бы энергетически выгодно распасться на α-частицы и более легкое ядро. Однако этого не происходит. Распадаются лишь тяжелые элементы: уран, радий, торий и некоторые другие.

Причина устойчивости ядер к α-распаду весьма необычна, и в ее установлении тоже принял участие Резерфорд. Он впервые обратил внимание на то, что α-распад, согласно законам классической физики, не имеет права на существование. Действительно, α-частица испускается тяжелым ядром и имеет при этом кинетическую энергию не более 10 МэВ. Теперь представим себе, рассуждал Резерфорд, что частица с такой энергией захотела бы проникнуть назад, в глубь ядра. Оказывается, это невозможно. Она не сможет приблизиться к ядру и войти в сферу действия ядерных сил, поскольку этому помешают силы электростатического отталкивания.

Для проникновения в ядро энергия частицы должна превышать некоторую критическую величину, так называемый потенциальный барьер. Величину барьера B_α можно оценить:

$$B_\alpha = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{(2e)(eZ)}{R_я},$$

где eZ — заряд ядра, $2e$ — заряд α-частицы, $R_я$ — радиус ядра. Для ядер, близких к урану, B_α составляет 30 МэВ.

Выходит, что природа, разрешив прямой процесс (α-распад), запретила обратный (проникновение частицы в ядро). Но во всех явлениях, с которыми до тех пор сталкивались физики, существование первого процесса всегда обусловливало возможность второго. Именно это и вызвало удивление Резерфорда.

Объяснение было дано *квантовой механикой*. В отличие от классической *механики* она допускает прохождение частицы сквозь барьер — туннельный переход (см. *Туннельный эффект*). С помощью туннельного перехода α-частица может попасть в тяжелое ядро. Тогда становится ясно, что с помощью точно такого же перехода осуществляется и α-распад. Квантовая механика восстановила равноправность прямого и обратного процессов и позволила создать теорию α-распада.

Вероятность туннельного перехода очень быстро падает с увеличением высоты и ширины потенциального барьера. Она ничтожно мала для многих ядер, и поэтому они не испытывают α-распада. А для α-активных ядер период полураспада (время распада половины ядер) меняется в очень широких пределах — от $7{,}13 \cdot 10^8$ лет (уран-235) до $3 \cdot 10^{-7}$ с (полоний-212), в зависимости от проницаемости барьера.

Для естественных радиоактивных изотопов энергия α-частиц лежит в пределах 2—8 МэВ, скорость порядка 10^7 м/с, пробег в воздухе — несколько сантиметров.

На современных *ускорителях заряженных частиц* — циклотронах, фазотронах — удается разогнать α-частицы до энергий, в сотни раз бóльших.

Необходимая для получения аморфного состояния скорость охлаждения очень сильно зависит от природы вещества, главным образом от его вязкости: более вязкие расплавы чаще застывают в виде стекол. Так, обычное стекло можно получить просто охлаждением расплава на воздухе. Чистые *металлы* получить в аморфном состоянии практически невозможно, а некоторые сплавы — можно. При скоростях охлаждения, превышающих миллион градусов в секунду, удалось получить «металлические стекла» — аморфные металлические сплавы (АМС).

АМС обладают высокими магнитными свойствами и почти не имеют магнитных потерь, поэтому они незаменимы для изготовления

АМОРФНОЕ СОСТОЯНИЕ

С помощью *рентгеновских лучей* удалось установить, что существуют такие твердые вещества (см. *Твердое тело*), в которых частицы расположены в беспорядке, как в жидкости. Эти вещества называют аморфными или с т е к л а м и, потому что обыкновенное стекло — самый типичный пример аморфного вещества.

Аморфное состояние — промежуточное между кристаллическим и газообразным: частицы располагаются менее правильно, чем в кристалле, но и менее беспорядочно, чем в газах.

В переводе с греческого «аморфный» означает «бесформенный». Такое название эти вещества получили потому, что в отличие от кристаллов они не имеют от природы формы многогранников.

Если расплав охлаждать с большой скоростью, то жидкость затвердевает, так и не начав кристаллизоваться. Атомы просто не успевают выстроиться в решетку и сохраняют хаотическое расположение, свойственное жидкости. Однако это уже не жидкое, а твердое вещество. Его *вязкость* много больше, чем у жидкости, и близка к вязкости кристалла.

Это вещество твердое, но не кристалл. Можно сказать, что оно занимает промежуточное место между кристаллами и газами и в то же время это не жидкость Такое вещество называют аморфным. С ним все знакомы на примере обыкновенного стекла.

сердечников трансформаторов, магнитных головок для звуко- и видеозаписи и т. п.

Успехи в развитии многих областей техники в значительной степени обязаны созданию новых типов стекол и материалов на их основе. Благодаря однородности аморфного состояния и отсутствию в нем дефектов, свойственных кристаллам, стекла обладают рядом исключительно важных свойств: прозрачностью в различных диапазонах электромагнитных колебаний, химической стойкостью, долговечностью, твердостью, электроизолирующими и другими физико-химическими свойствами. Такие стекла широко применяются в быту, строительстве, в производстве электронно-лучевых трубок, электроизоляторов для высоковольтных линий электропередачи, различных стекловолокон, волоконной оптики, стеклосмазок и т. д.

АНТИВЕЩЕСТВО

Антивещество — *материя*, построенная из а н т и ч а с т и ц. Существование античастиц было впервые предсказано в 1930 г. английским физиком П. Дираком. Из уравнения Дирака для релятивистского *электрона* следовало второе решение для его двойника, имеющего ту же *массу* и положительный электрический заряд. В то время была известна лишь одна положительно заряженная частица — *протон*, резко отличающаяся по своим свойствам от электрона. Теоретики стали придумывать хитроумные объяснения этих различий, но вскоре выяснилось, что протон не имеет ничего общего с частицей, предсказанной Дираком. В 1932 г. положительно заряженные а н т и э л е к т р о н ы (теперь их называют п о з и т р о н а м и) обнаружил в *космических лучах* американский физик К. Андерсон. Это открытие явилось блестящим подтверждением теории Дирака.

В 1955 г. на новом ускорителе в Беркли (США) Э. Сегре, О. Чемберлен и другие обнаружили а н т и п р о т о н ы, рожденные в столкновениях ускоренных протонов с ядрами медной мишени. До этого протон с отрицательным зарядом долго и безуспешно разыскивался в космических лучах. В 1956 г. был открыт и а н т и н е й т р о н. Сейчас известно уже множество частиц, и почти всем им соответствуют античастицы.

Частицы и античастицы имеют одинаковую массу, время жизни, *спин*, но различаются знаками всех зарядов: электрического, барионного (см. *Протон*), лептонного (см. *Лептоны*) и т. д. Это следует из общих принципов квантовой теории поля (см. *Квантовая механика*) и подтверждается надежными экспериментальными данными.

С современной точки зрения *элементарные частицы* разбиваются на д в е г р у п п ы. Первая из них — частицы с п о л у ц е л ы м *спином*: заряженные *лептоны* e^-, μ^-, τ^-, соответствующие им *нейтрино* и *кварки* u, d, s, c, b, t. Все эти частицы обладают и античастицами. Другая группа — это кванты полей с ц е л ы м *спином*, переносящие взаимодействия: *фотон*, промежуточные бозоны *слабых взаимодействий*, глюоны *сильных взаимодействий*. Некоторые из них истинно нейтральны (γ, Z^0), т. е. все квантовые числа равны нулю и они идентичны своим античастицам; другие (W^+, W^-) также образуют пары частица — античастица. Легко теперь увидеть, что все барионы, состоящие из трех кварков, должны иметь античастицы, например: *нейтрон* имеет состав (udd), антинейтрон — ($\tilde{u}\tilde{d}\tilde{d}$). Мезоны состоят из кварка и антикварка и, вообще говоря, также имеют античастицы, например: π^--мезон состоит из кварков ($d\tilde{u}$), а π^+-мезон состоит из кварков ($\tilde{d}u$). В то же время имеются мезоны, симметричные относительно замены кварков на антикварки (например, π^0, ρ, η-мезоны, куда входят пары кварков $u\tilde{u}$, $d\tilde{d}$ и $s\tilde{s}$); такие мезоны будут истинно нейтральными (см. *Адроны*).

Характерная особенность поведения частиц и античастиц — их а н н и г и л я ц и я при столкновении. Еще Дирак предсказал процесс аннигиляции электронов и позитронов в *фотоны*: $e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$. Процессы аннигиляции идут, разумеется, с сохранением энергии, импульса, электрического заряда и т. п. При этом могут рождаться не только фотоны, но и другие частицы; очевидно, что вследствие законов сохранения различных зарядов одновременно рождаются и соответствующие античастицы, как, например, в реакции аннигиляции электрона и позитрона в пару м ю о н о в: $e^- + e^+ \to \mu^- + \mu^+$. В таких реакциях были открыты «очарованные» и «прелестные» частицы (см. *Адроны*). В аналогичном процессе $e^- + e^+ \to \tau^- + \tau^+$ открыли тяжелый τ-лептон (тау-лептон, см. *Лептоны*). В последние годы процесс аннигиляции все чаще используется как один из самых совершенных методов исследования микромира.

Операция замены частиц на античастицы получила название з а р я д о в о г о с о п р я ж е н и я. Так как истинно нейтральные частицы тождественны своим античастицам, то при операции зарядового сопряжения они переходят сами в себя. Поэтому истинно нейтральные частицы характеризуются особым к в а н т о в ы м ч и с л о м, которое называется з а р я д о в о й ч е т н о с т ь ю (см. *Четность*) и показывает, как ведет себя волновая функция такой частицы при зарядовом сопряжении. Зарядовая четность может быть положительной, как, например, у π^0-мезонов, η-мезонов и некоторых других частиц. Это означает, что волновая функция этих частиц не меняется при заря-

довом сопряжении. Но есть истинно нейтральные частицы, у которых зарядовая четность отрицательна, т. е. их волновая функция при соответствующей операции меняет знак. Примером такой частицы является *фотон* — квант электромагнитного поля. Это довольно легко понять, ведь электрические и магнитные поля меняют знак при изменении знаков всех зарядов, т. е. при операции зарядового сопряжения.

В сильных и электромагнитных взаимодействиях имеется полная симметрия между частицами и античастицами: если возможен какой-то процесс с частицами, то возможен и имеет те же характеристики аналогичный процесс с соответствующими античастицами. Это означает, что в таких взаимодействиях не меняется, в частности, зарядовая четность истинно нейтральной частицы или системы частиц. Поэтому, например, π^0-мезоны с положительной зарядовой четностью распадаются электромагнитным образом на два фотона (у каждого из которых отрицательная зарядовая четность) и не могут распадаться на три фотона. Далее, подобно тому как протоны и нейтроны благодаря сильному взаимодействию связываются в ядра, из соответствующих античастиц будут образовываться а н т и я д р а.

В 1965 г. на ускорителе в США был получен а н т и д е й т р о н (связанное состояние антипротона и антинейтрона). В 1969 г. в Протвино на ускорителе Института физики высоких энергий советские физики открыли ядра а н т и г е л и я-3, состоящие из двух антипротонов и антинейтрона. Затем были открыты и ядра а н т и т р и т и я — тяжелого антиводорода, состоящие из одного антипротона и двух антинейтронов. В принципе можно представить себе и антиатомы, и даже большие скопления антивещества. Свидетельством присутствия антивещества во Вселенной было бы мощное аннигиляционное излучение, приходящее из областей соприкосновения вещества с антивеществом.

Ведь аннигиляция только 1 г вещества и антивещества приводит к выделению 10^{14} Дж энергии ($E = mc^2$), что эквивалентно взрыву средней атомной бомбы в 10 килотонн. Однако *астрофизика* таких данных пока не имеет, и даже в космических лучах антипротоны встречаются довольно редко. Сейчас уже практически нет сомнений, что Вселенная в основном состоит из обычного вещества.

Но так было не всегда. На ранней стадии развития Вселенной при очень больших температурах $\sim 10^{13}$ К количество частиц и античастиц почти совпадало: на большое количество антипротонов (примерно на каждые несколько миллиардов) приходилось столько же протонов и еще один «лишний» протон. В дальнейшем при остывании Вселенной все частицы и античастицы проаннигилировали, породив в конечном итоге *фотоны*, а из ничтожного в прошлом избытка частиц возникло все, что нас теперь окружает. Аннигиляционные фотоны, постепенно охлаждаясь, дожили до наших дней в виде реликтового излучения (см. *Астрофизика*). Отношение современной плотности протонов к плотности реликтовых фотонов ($\sim 10^{-9}$) и дало нам сведения о величине избытка частиц над античастицами в прошлом. Если бы этого избытка не было, то произошла бы полная взаимная аннигиляция частиц и античастиц и в результате возникла бы довольно унылая Вселенная, заполненная холодным фотонным газом.

Откуда же взялся этот избыток? Одна из гипотез предполагает, что в начальном состоянии число частиц и античастиц совпадало, но затем из-за особенностей в динамике их взаимодействия возникла асимметрия.

Идеи о возникновении во Вселенной асимметрии между частицами и античастицами были впервые высказаны в 1960-х гг. Но такого рода научная теория пока не завершена и находится в стадии развития.

АСТРОФИЗИКА

Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физическую природу небесных тел и их систем, их происхождение и эволюцию.

Как ясно из самого названия, астрофизика — это физика небесных тел. Космос является по существу большой физической «лабораторией», где возникают условия, часто совершенно недостижимые в земных физических лабораториях и представляющие поэтому исключительный интерес для науки. Астрофизические методы исследований имеют две существенные особенности, отличающие их от методов лабораторной физики. Во-первых, в лаборатории физик сам ставит эксперименты, подвергает исследуемые тела различным воздействиям. В астрофизике возможны только пассивные наблюдения, так как пока нельзя проводить эксперименты, например, на звездах. Во-вторых, если в лаборатории можно непосредственно измерять температуру, плотность, химический состав тел и т. д., то в астрофизике почти все данные о далеких небесных телах получают с помощью анализа приходящих от них *электромагнитных волн* — видимого света и других, невидимых глазом лучей.

Основу астрофизики составляют астрофизические наблюдения. При этом важнейший метод — с п е к т р а л ь н ы й а н а л и з, т. е. исследование потока энергии приходящего на землю излучения в зависимости от длины электромагнитных волн. Электромагнитные волны несут информацию об условиях в веществе, где они зарождаются или где испытывают погло-

Радиоастрономическая станция Физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР (Пущино, Московская область).

Туманность — это облака межзвездного газа и пыли.

Обсерватория Института астрофизики Академии наук Казахской ССР.

щение и рассеяние. Задача спектрального анализа — расшифровать эту информацию.

Появление спектрального анализа во второй половине XIX в. сразу позволило делать выводы о химическом составе небесных тел. Одним из первых блестящих достижений астрофизики, полученных с помощью этой экспериментальной методики, явилось открытие неизвестного ранее элемента — г е л и я — при изучении спектра хромосферы Солнца во время полного затмения в 1868 г. В дальнейшем, в результате развития *экспериментальной* и *теоретической физики* стало возможным с помощью спектрального анализа определять буквально все физические характеристики небесных тел и межзвездной среды. Спектры позволяют узнать температуру газа, его плотность, относительное содержание разных химических элементов, состояние атомов этих элементов, скорости движения газа, напряженности магнитных полей. По спектрам звезд можно также вычислить расстояние до них, узнать их скорости движения по лучу зрения, измерить вращение и выяснить многое другое.

В современных спектральных приборах, применяемых в телескопах, используют новейшие фотоэлектрические приемники излучения (см. *Фотоэффект*), которые гораздо точнее и чувствительнее, чем фотопластинка или человеческий глаз.

Бурное развитие техники и экспериментальной физики за последние десятилетия привело к созданию астрофизических инструментов, предназначенных для изучения невидимых глазом электромагнитных волн. Астрофизика стала «многоволновой». Это, конечно, неизмеримо расширило ее возможности получать информацию о небесных телах. Еще в 30-е гг. текущего столетия было открыто радиоизлучение нашей Галактики. В последующие годы построены гигантские радиотелескопы и сложные системы таких радиотелескопов. С помощью радиотелескопов наблюдают, например, холодный межзвездный газ, не излучающий видимого света, изучают движение электронов в межзвездных магнитных полях. Радиоизлучение приходит на Землю от далеких галактик, часто неся сведения о происходящих там бурных взрывных процессах. Р а д и о а с т р о н о м и я стала одним из основных способов изучения нейтронных звезд — пульсаров. Радиоволны несут сведения об остатках вспышек сверхновых звезд и о совершенно удивительных

Большой азимутальный телескоп Зеленчукской астрофизической обсерватории Академии наук СССР.

условиях в плотных газовых облаках. Наконец, радиоастрономия позволила открыть реликтовое излучение Вселенной — слабое электромагнитное излучение, заполняющее всю Вселенную и имеющее температуру около 3 К. Это излучение — остывший остаток (реликт) от прошлого состояния вещества в расширяющейся Вселенной, когда оно около 15 млрд. лет назад было плотным и горячим (см. *Космология, Материя, Пространство*).

Много интересного узнали астрофизики с помощью инфракрасных лучей, которые свободно проходят сквозь облака пыли, поглощающие видимый свет (см. *Инфракрасное излучение*). Так, в инфракрасных лучах наблюдаются процессы в ядре нашей Галактики, а также «молодые» звезды, зарождающиеся в плотных газово-пылевых комплексах.

Особый интерес для астрономии имеет астрофизика высоких энергий, изучающая процессы бурного выделения энергии, часто связанные с катастрофическими явлениями в небесных телах. Возникающее при этом электромагнитное излучение имеет высокую частоту, соответственно короткую длину волны и относится к невидимым ультрафиолетовым, рентгеновским и гамма-лучам (см. *Рентгеновские лучи, Гамма-излучение*). Эти виды излучений поглощаются земной атмосферой. Поэтому развитие данных разделов наблюдательной астрофизики стало возможно только с началом космической эры, после создания обитаемых и автоматических научных станций за пределами земной атмосферы.

Астрофизика высоких энергий привела ко многим удивительным открытиям. С помощью рентгеновских телескопов были открыты горячий газ в скоплениях галактик, импульсное рентгеновское излучение нейтронных звезд в двойных звездных системах. Наконец, было открыто излучение сильно нагретого плотного газа, по-видимому, закручивающегося вихрем при падении в черную дыру. Гамма-телескопы позволили обнаружить в центре нашей Галактики процессы аннигиляции электронов и позитронов — превращения их при столкновении в *гамма-излучение*.

В последние годы начал развиваться новый раздел астрофизики — нейтринная астрономия. *Нейтрино* благодаря своей огромной проникающей способности представляет собой единственный вид излучения, которое может попадать на Землю из самих глубин Солнца и звезд и приносить информацию о протекающих там процессах. Уже первые данные о потоках солнечных нейтрино позволили сделать очень интересные гипотезы о процессах *термоядерного синтеза* в недрах Солнца; их предстоит проверить в будущих опытах.

Сейчас ведутся поиски нейтринных вспышек от сверхновых звезд в момент их гравитационного коллапса (т. е. сжатия под действием силы тяжести), в результате чего огромные количества энергии должны уноситься в виде нейтринного излучения. Расчеты показывают, что эти нейтринные вспышки могут быть зарегистрированы в подземных лабораториях (та-

ких, например, как Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований АН СССР), даже если вспыхнувшая сверхновая звезда оптически ненаблюдаема из-за слишком больших расстояний.

На основе данных наблюдательной астрофизики, опираясь на законы физики, астрономы делают выводы об условиях в небесных телах, которые непосредственно не наблюдаются. Например, рассчитывают внутреннее строение звезд и Солнца с использованием наблюдательных данных об условиях на их поверхности. Теоретическая астрофизика позволяет также описать эволюцию Солнца, звезд и других небесных тел.

Как уже говорилось, при изучении астрофизических явлений астрономы часто встречаются с физическими условиями, совершенно недостижимыми в земных лабораториях. Так, плотность межзвездного газа в миллиарды раз меньше плотности воды, а плотность нейтронных звезд такая же, как и плотность *атомных ядер*; напряженность магнитного поля нейтронных звезд в тысячи миллиардов раз превышает напряженность магнитного поля Земли.

Не удивительно, что в столь необычных условиях возможно протекание новых, неизвестных процессов, а значит, и открытие новых физических закономерностей. В этом состоит значение астрофизики для физики, для всей фундаментальной науки, познающей окружающий мир.

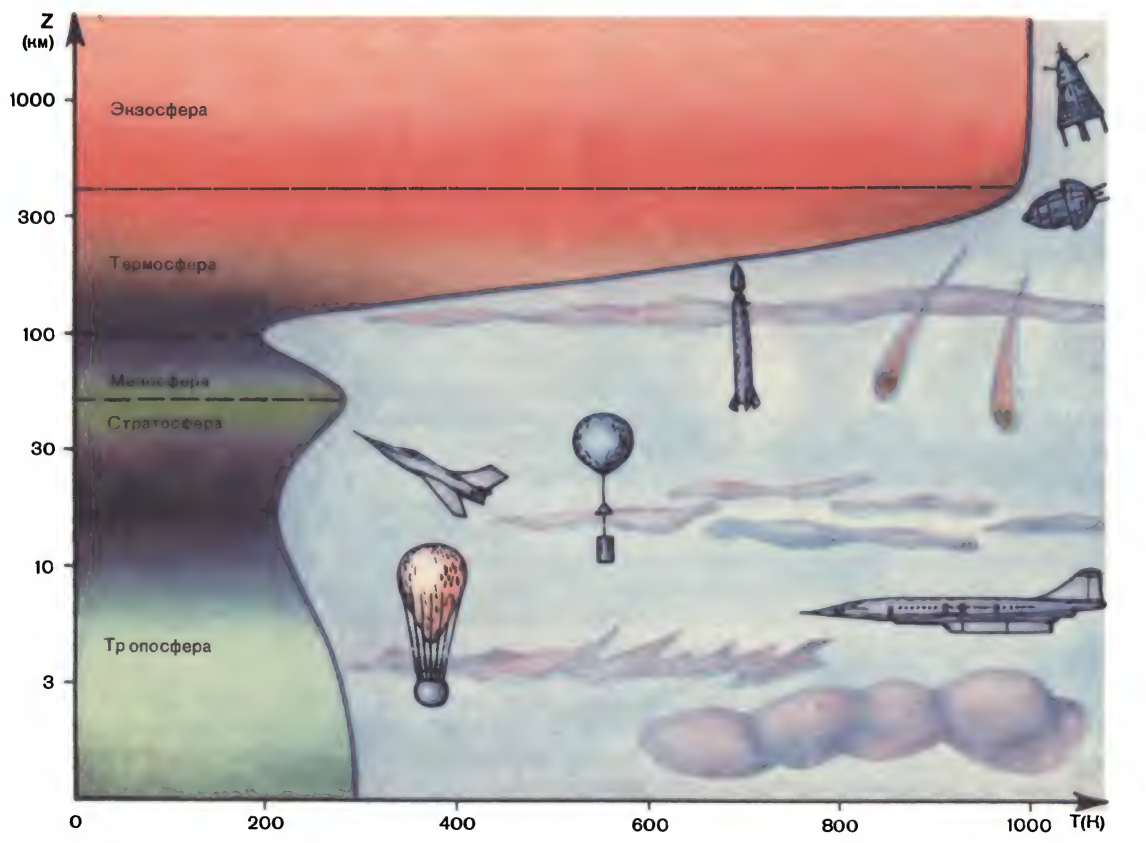
АТМОСФЕРА

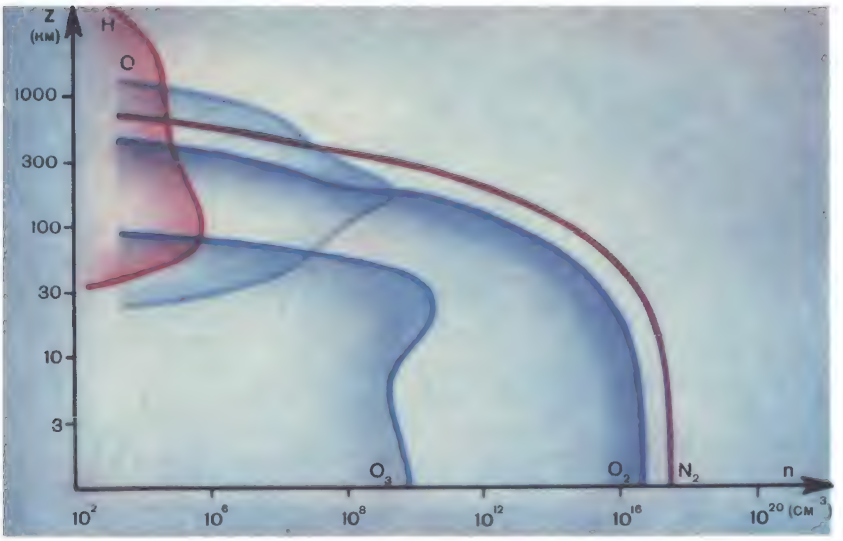
Это слово происходит от греческих слов «атмос» и «сфера», которые означают «пар» и «оболочка». Газовые оболочки окружают все звезды и все большие планеты. Малые же небесные тела лишены атмосфер. Происходит это потому, что ускорение силы тяжести g на поверхности малых небесных тел и их радиус R недостаточно велики, отчего вторая космическая скорость $v = \sqrt{2gR}$ оказывается меньше тепловой скорости газовых молекул — малые небесные тела не могут удержать газ.

Но даже от звезд и больших планет газ атмосфер медленно улетучивается в космос. Так, Солнце теряет каждую секунду 10^9 кг водорода и гелия. Поток *протонов*, ядер гелия и *электронов* от нашей звезды называют *солнечным ветром*. А с Земли ежесекундно улетучивается в космос 1 кг водорода. Откуда же берется этот водород? Его ведь ничтожно мало в приземном воздухе.

Оказывается, водород образуется на высотах 90 — 150 км из паров воды под действием ультрафиолетовой части излучения Солнца. Оценим, надолго ли хватит воды в земном океане

Зависимость температуры в атмосфере от высоты.





Изменение с высотой концентраций некоторых газов атмосферы.

($m = 1{,}4 \cdot 10^{21}$ кг) при такой убыли водорода. Окажется, что весь океан испарится только через 5000 млрд. лет, что в 1000 раз больше современного возраста Земли.

На больших высотах в атмосфере Земли ультрафиолетовое излучение Солнца разбивает не только молекулы воды. Начиная с высоты 90 км состав атмосферы существенно отличается от привычного нам состава приземного воздуха. Происходит это потому, что на этих высотах газы из молекулярных становятся атомарными. Ясно, что чем меньше масса атома или молекулы, тем легче этому газу за счет теплового движения подняться на большую высоту, а в конечном счете и улетучиться в космос.

Строение планетных атмосфер определяется, с одной стороны, их составом, а с другой — интенсивностью солнечного излучения и, следовательно, расстоянием до Солнца. Атмосферу Земли разделяют на несколько слоев (см. рис.) в зависимости от того, возрастает в них температура с высотой или понижается. 80% всего воздуха Земли сосредоточено в тропосфере — слое, прилегающем к поверхности. Это самая важная для нас часть атмосферы. Неравномерный нагрев тропосферы рождает ветры всей планеты. Трение ветра о водную поверхность приводит к образованию пассатных и муссонных течений. Испарившаяся с поверхности морей и океанов вода, поднявшись в высоту, конденсируется в мелкие капельки облаков и туманов, из них выпадают осадки.

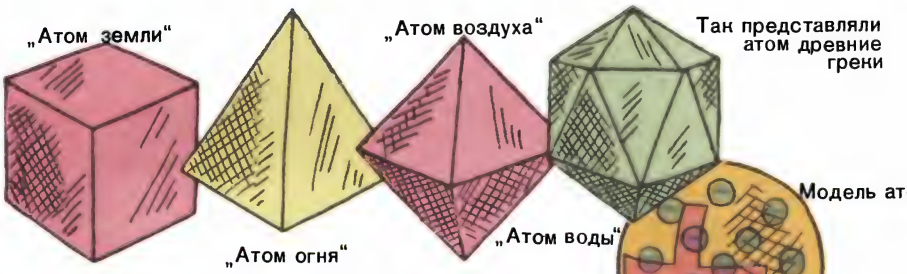
На высотах 20—50 км расположен озонный слой. Именно озон O_3, поглощающий ультрафиолетовое солнечное излучение, и дает повышение температуры на высотах около 50 км. В отсутствие озонного «экрана», защищающего нас от ультрафиолетового излучения, в больших дозах вредного для здоровья, жизнь на Земле в современных ее формах оказалась бы невозможной.

Выше 90 км солнечное излучение не только вызывает химические реакции разложения газов, но и ионизирует их. Образующиеся при этом ионы и свободные электроны располагаются несколькими слоями *ионосферы* Земли. На высотах 150 — 1000 км из-за поглощения солнечного излучения атомами температура термосферы и экзосферы повышается. Эту температуру, однако, нельзя измерить термометром: плотность газа на этих высотах так мала, что тепловое равновесие между ним и термометром не могло бы установиться. Температура в данном случае измеряется по средней кинетической энергии молекул и атомов; она достигает 700 — 900°С.

АТОМ

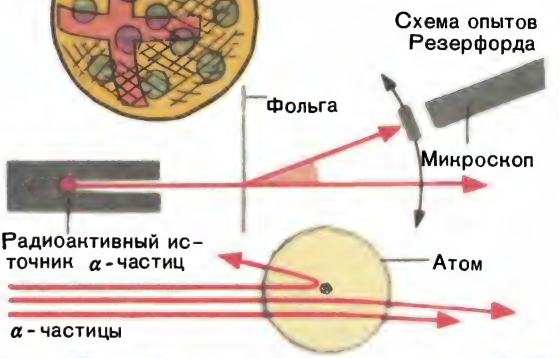
Все тела, включая нас самих, состоят из мельчайших «кирпичиков», называемых атомами. Существует столько типов таких «кирпичиков», сколько имеется в природе химических элементов. Химический элемент — это совокупность атомов одного и того же типа.

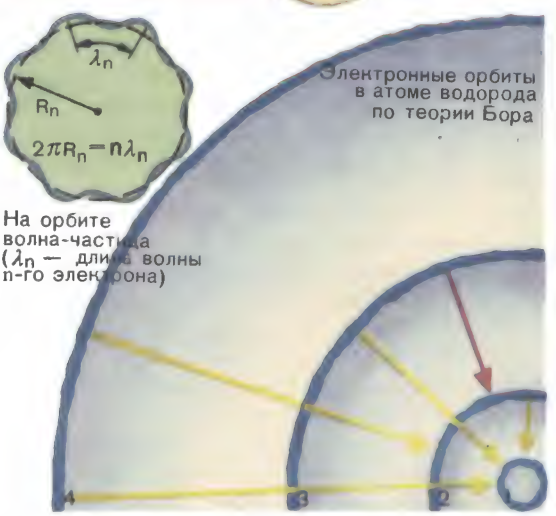
Мысль о том, что вещество построено из мельчайших «частичек», высказывалась еще древнегреческими учеными. Они-то и назвали эти частички атомами (от греческого слова, означающего «неделимый»). Древние греки предполагали, что атомы имеют форму правильных многогранников: куба («атомы земли»), тетраэдра («атомы огня»), октаэдра («атомы воздуха»), икосаэдра («атомы воды»). Прошло более двадцати столетий, прежде чем были получены экспериментальные подтверждения идеи атомистического строения вещества. Окончательно эта идея утвердилась в науке во второй половине XIX в. благодаря успехам химии и *кинетической теории*. К началу

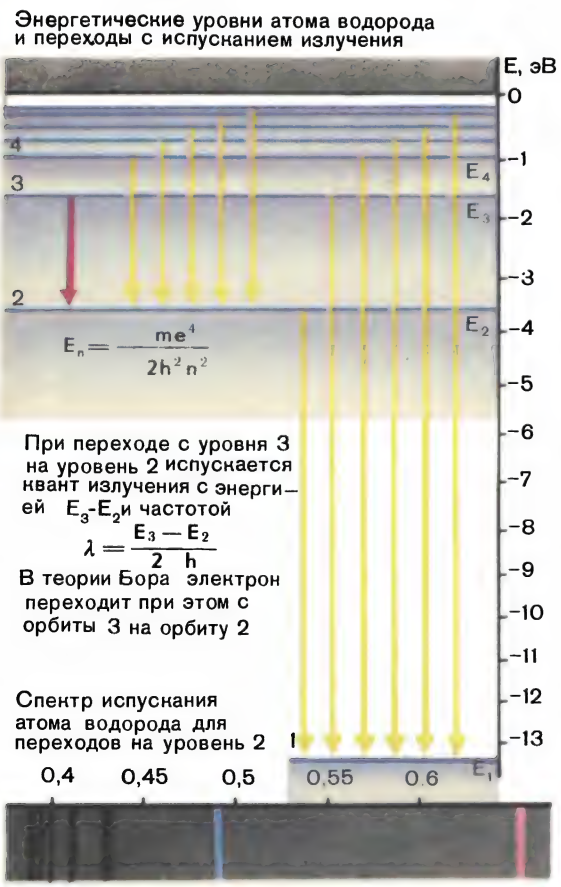


XX в. физики уже знали, что атомы имеют размеры порядка 10^{-10}м и массу 10^{-27} кг. К этому времени стало ясно, что атомы вовсе не «неделимы», что они обладают определенной внутренней структурой, разгадка которой позволит объяснить периодичность свойств химических элементов, выявленную Д. И. Менделеевым (см. *Периодическая система химических элементов*).

В 1903 г., вскоре после открытия *электрона*, английский физик Джозеф Джон Томсон предложил модель атома в виде положительно заряженной по объему сферы диаметром около 10^{-10} м, внутрь которой «вкраплены» электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов компенсируется положительным зарядом сферы. Когда электроны колеблются относительно центра сферы, атом излучает свет. Томсон считал, что электроны группируются в слои вокруг центра сферы.



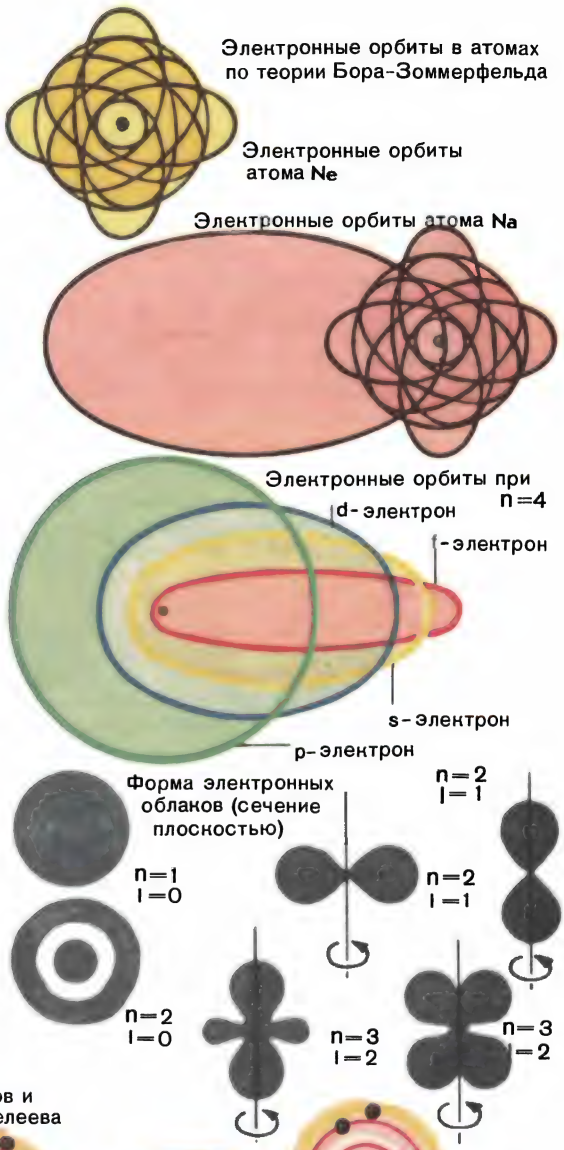




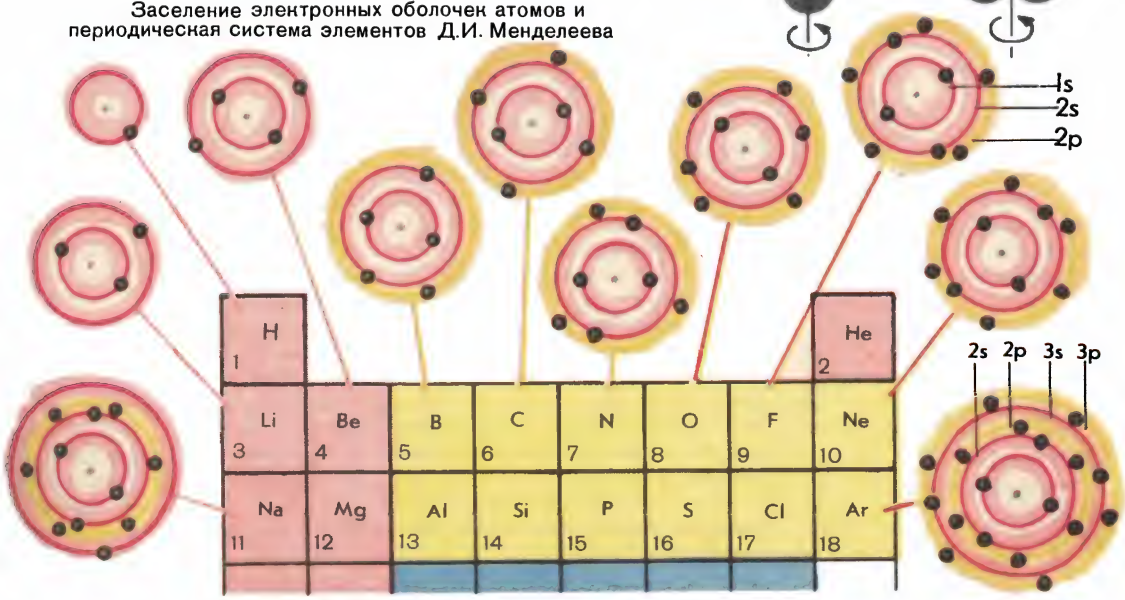
В модели, предложенной Томсоном, масса атома равномерно распределена по его объему. Ошибочность такого предположения вскоре доказал английский физик Эрнест Резерфорд. В 1908—1911 гг. под его руководством были выполнены опыты по рассеянию α-частиц (ядер гелия) металлической фольгой (см. *Альфа-распад*). α-частица проходила сквозь тонкую фольгу (толщиной 1 мкм) и, попадая на экран из сернистого цинка, порождала вспышку, хорошо наблюдаемую в микроскоп. Экран ориентировали под разными углами к первоначальному направлению движения α-частиц и подсчитывали число частиц, рассеянных фольгой на тот или иной угол. Оказалось, что большинство частиц свободно прохо-

дит сквозь фольгу, испытывая лишь незначительные отклонения; однако в отдельных редких случаях (примерно в одном на 10 000) наблюдалось рассеяние α-частиц на угол больше 90°. «Это было почти так же невероятно,— вспоминал впоследствии Резерфорд,— как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в лист папиросной бумаги, а снаряд вернулся бы назад и попал в вас». Опыты по рассеянию α-частиц убедительно показали, что почти вся масса атома сосредоточена в очень малом объеме — *атомном ядре*, диаметр которого примерно в 10 000 раз меньше диаметра атома. Большинство α-частиц пролетает мимо массивного ядра, не задевая его, но изредка происходит столкновение α-частицы с ядром, и тогда она может «отскочить» назад.

Опыты Резерфорда послужили основой для создания ядерной модели атома. Эта модель определяет наши сегодняшние представления об устройстве атома. В центре атома находится *атомное ядро* (его размеры порядка 10^{-14} м); весь остальной объем атома «представлен» *электронами*. Внутри ядра электронов нет (это стало ясно в начале 30-х гг.); ядро состоит из положительно заряженных *протонов* и не имеющих заряда *нейтронов*. Число электронов в атоме равно числу протонов в ядре; это есть атомный номер данного химического элемента (его порядковый номер в периодической системе). Масса электрона примерно в 2000 раз меньше массы протона или нейтрона, поэтому почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Разные электроны в разной степени связаны с ядром; некоторые из них атом может относительно легко потерять, превращаясь при этом в положительный ион.



Заселение электронных оболочек атомов и периодическая система элементов Д.И. Менделеева



Приобретая дополнительные электроны, атом превращается в отрицательный ион. При поглощении электромагнитного излучения, например света, атом возбуждается. Существенно, что атом может поглощать и испускать лишь определенные, характерные для данного химического элемента порции (кванты) энергии; недаром спектры поглощения и испускания атомов газообразных веществ состоят из упорядоченных наборов отдельных линий. В связи с этим говорят об определенных энергетических уровнях атома. При поглощении излучения атом переходит (совершает квантовый переход) с нижних уровней на более высокие, а при испускании излучения — с верхних на более нижние. Энергия поглощенного (испущенного) кванта излучения всякий раз равна разности энергий уровней, между которыми произошел рассматриваемый квантовый переход.

Первую количественную теорию атома разработал в 1913 г. датский физик Нильс Бор. Это была теория простейшего атома — атома водорода. Бор использовал результаты опытов Резерфорда и известные в то время сведения о спектре атомарного водорода. Он представлял себе атом водорода в следующем виде: вокруг *протона* (ядра атома) по круговой орбите движется *электрон*. Для невозбужденного атома радиус орбиты составляет $0{,}5 \cdot 10^{-10}$ м. При возбуждении атома электрон перескакивает на одну из более удаленных от ядра орбит. Радиусы возможных орбит описываются формулой $R_n = \hbar^2 n^2 / me^2$, где $\hbar \simeq 10^{-34}$ Дж/с — постоянная Планка, $m = 9 \cdot 10^{-31}$кг — масса электрона, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$Кл — заряд электрона, $n = 1, 2, 3...$— главное квантовое число, фиксирующее порядковый номер орбиты электрона. Каждой орбите отвечает определенная энергия электрона: $E_n = -me^4/2\hbar^2 n^2$ (ее отрицательность означает, что электрон находится в связанном состоянии; за нуль принимается энергия свободного электрона).

ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД (1871 — 1937)

Английский ученый, известный своими исследованиями строения *атома* и *радиоактивности*, один из создателей *ядерной физики*. Э. Резерфорд был членом Лондонского королевского общества — академии наук Англии, почетным членом более 30 академий и научных обществ разных стран мира, в том числе Академии наук СССР. В 1908 г. он стал лауреатом Нобелевской премии за исследования радиоактивности.

В 1898 г. Резерфорд приступил к изучению явления радиоактивности. Первым его фундаментальным открытием в этой области было обнаружение неоднородности излучения, испускаемого ураном. Так в науку о радиоактивности впервые вошло понятия об α- и β-лучах (см. *Альфа-распад, Бета-распад*). В том же году Резерфорд покинул Кавендишскую лабораторию в Кембридже, где он начинал свою научную деятельность, и переехал в Канаду. Там он был избран профессором университета в Монреале. С этим научным центром связаны многие важные открытия ученого. В 1900 г. он открыл новый радиоактивный элемент — эманацию тория. В 1901 — 1903 гг. совместно с английским ученым Ф. Содди проводит исследования, которые привели к открытию естественного превращения элементов и разработке теории радиоактивного распада атомов.

В 1907 г. Резерфорд возвращается в Англию и работает в Манчестерском университете. Здесь в 1908 г. он окончательно доказал, что α-частица — это дважды ионизированный атом гелия. В 1911 г. Резерфорд опубликовал статью, в которой предложил ядерную (планетарную) модель атома. В 1913 г. появляются работы Н. Бора и Г. Мозли, на осуществление которых в большой степени повлияли исследования Э. Резерфорда. Наконец, в 1919 г. ученый приходит к выводу о возможности искусственного превращения элементов. Э. Резерфорд стал основателем новой атомистики.

В последний период своей жизни он был директором Кавендишской лаборатории (с 1919 г.). Здесь он детально изучал протекание ядерных реакций под действием α-частиц и разрабатывал теоретические представления о модели атомного ядра. Резерфорд в 1921 г. предсказал существование нейтрона, открыл который в 1932 г. его ученик Дж. Чедвик.

Научная школа Резерфорда стала одной из крупнейших за всю историю физики и самой большой в истории ядерной физики. Учениками Э. Резерфорда были такие крупные английские физики, как Г. Мозли, Дж. Чедвик и другие, а также ряд иностранных ученых — Н. Бор, О. Ган. Из советских физиков у него работали П. Л. Капица, Ю. Б. Харитон и некоторые другие.

В 1915 г. немецкий физик Арнольд Зоммерфельд попытался обобщить теорию Бора на различные атомы. Он показал, что при более общем подходе круговые орбиты электронов в атоме следует заменить эллиптическими. Энергия электрона определяется в основном величиной большой полуоси эллипса, которая в свою очередь задается главным квантовым числом n. При этом степень вытянутости эллипса связана с величиной момента количества движения электрона. Она определяется так называемым орбитальным квантовым числом l, принимающим (при заданном квантовом числе n) значения: 0, 1, 2,..., n — 1. Электроны с $l = 0$ называют s-электронами, $l = 1$ — p-электронами, $l = 2$ — d-электронами, $l = 3$ — f-электронами и т. д. По мере роста значения l степень вытянутости эллиптической орбиты электрона уменьшается.

Согласно теории Бора — Зоммерфельда, атомы уподобляются миниатюрным планетным системам, где в качестве «планет» выступают электроны, движущиеся по орбитам вокруг

НИЛЬС ХЕНРИК ДАВИД БОР (1885 — 1962)

Датский физик Нильс Бор родился в Копенгагене в семье ученого-физиолога. Окончив Копенгагенский университет, Бор после защиты докторской диссертации в 1911 г. уехал на стажировку в Англию. Уже в своей диссертационной работе, посвященной электронной теории металлов, он пришел к мысли о недостаточности представлений классической физики для объяснения электронных и атомных процессов, явлений электромагнитного излучения. Эта мысль превратилась в твердое убеждение, когда Н. Бор в 1912 г. стал работать у известного английского физика Э. Резерфорда. Незадолго до этого Резерфорд прямым экспериментом доказал, что *атом* можно уподобить микроскопической солнечной системе с «планетами» — электронами, обращающимися вокруг «Солнца» — тяжелого положительно заряженного ядра. Резерфордовская модель атома шла вразрез с канонами классической физики, и мало кто из ученых отнесся к ней достаточно серьезно. Но Бор понял, что исходя из этой модели можно построить новую физику — квантовую физику атома.

Эта задача была решена им в трех фундаментальных работах, опубликованных в 1913 г. Введя свои знаменитые квантовые постулаты, определяющие строение атома и условия испускания и поглощения им электромагнитного излучения, Бор дал блестящее объяснение строгим закономерностям расположения спектральных линий атомов и молекул.

Теория Бора была подлинной революцией в физике и вообще в представлениях человека об окружающем мире: она показала, что атомы «живут» по законам, совершенно не похожим на те, которые управляют поведением макроскопических тел. Со временем стало ясно, что резерфордовская модель — лишь приближенная схема реального атома, который «устроен» несравненно сложнее. Но угаданные Бором, благодаря его необыкновенной интуиции, квантовые постулаты поколеблены не были и легли в основу современной *теоретической физики.*

Важное значение имели и дальнейшие работы Бора по строению *атома* и *атомного ядра,* взаимодействию частиц с веществом. Но, наверное, не менее значительны заслуги Бора в открытии и осмыслении новых фундаментальных принципов квантовой механики и их превращении в достояние и рабочий инструмент науки. На протяжении почти полувека Бор был признанным лидером квантовой теории, а основанный им в 1920 г. в Копенгагене Институт теоретической физики в 20 — 30-е гг. по праву считался международным центром этой новой и бурно развивающейся науки. Большинство ученых славной плеяды создателей *квантовой механики* с гордостью причисляли себя к ученикам Н. Бора, и в том числе советский физик, академик Л. Д. Ландау.

В 1922 г. Н. Бор стал лауреатом Нобелевской премии.

Имя Бора приобрело всемирную известность, он был избран членом многих научных организаций мира.

В годы второй мировой войны, когда Дания была оккупирована гитлеровцами и стало известно о готовящемся аресте Н. Бора, организация Сопротивления помогла ему уехать сначала в Швецию, а затем — в США.

После войны Н. Бор активно включился в борьбу за мир, за запрещение атомного оружия. Большую роль сыграл он и в налаживании международного сотрудничества ученых в вопросах мирного использования атомной энергии, путь к овладению которой был проложен его научными трудами.

центрального тела — *атомного ядра*. Надо, однако, иметь в виду, что аналогия с планетными системами весьма условна. Дело в том, что в микромире нельзя пользоваться законами Ньютона, здесь действуют специфические законы *квантовой механики*. Движущийся по орбите *электрон* можно рассматривать, с одной стороны, как некую корпускулу (с определенными массой, энергией, зарядом), а с другой — как некую волну, длина которой укладывается на длине орбиты целое число раз (это число есть как раз главное квантовое число n). Если n относительно невелико, то длина электронной волны оказывается того же порядка, что и длина орбиты. Ясно, что в этом случае вообще не имеет смысла говорить об электронных орбитах.

Квантовая механика, отказываясь от наглядного образа электрона, предлагает представлять электрон в атоме в виде своеобразного электронного облака, более плотного в тех точках пространства, где более вероятно обнаружить этот электрон. Форма и эффективные размеры электронных облаков зависят от квантовых чисел n и l, определяющих состояние электрона в атоме.

В многоэлектронных атомах картина электронных облаков оказывается более сложной. В связи с этим рассматривают не само облако, а лишь расстояние до ядра, на котором наиболее вероятно обнаружить электрон, описываемый тем или иным набором чисел n и l. Это расстояние называют радиусом электронной оболочки, отвечающей данным значениям n и l. Если $n = 1$, $l = 0$, то говорят о $1s$-оболочке; $n = 2$, $l = 0$ — $2s$-оболочке; $n = 2$, $l = 1$ — $2p$-оболочке и т. д. Следует отметить, что на каждой электронной оболочке можно «поселить» не более строго определенного числа электронов: 2 — для s-оболочек, 6 — для p-оболочек, 10 — для d-оболочек. Это есть проявление *принципа Паули*.

По мере увеличения атомного номера элемента электроны постепенно заселяют электронные оболочки; последовательно заселяются оболочки: $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, $3p$, $4s$, $3d$, $4p$,... Например, в атоме лития (рассматривается невозбужденный атом) полностью заселена $1s$-оболочка и сверх того имеется один электрон в следующей s-оболочке ($2s$-оболочка). В атоме натрия полностью заселены оболочки $1s$, $2s$, $2p$ и имеется один электрон в $3s$-оболочке. В атоме калия полностью заселены оболочки $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, $3p$ и имеется один электрон в $4s$-оболочке. Единообразие конфигураций внешней электронной оболочки атомов щелочных металлов объясняет и общность их свойств. На данном примере можно видеть, каким образом картина заселяющихся электронных оболочек атома способна объяснить закономерности *периодической системы химических элементов*.

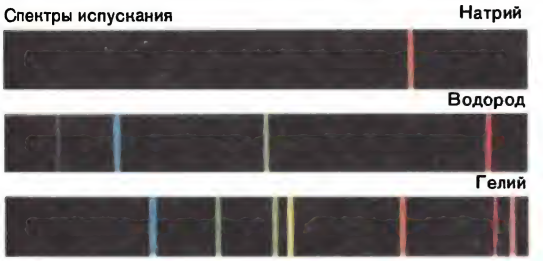
АТОМНАЯ ФИЗИКА

Атомная физика возникла на рубеже XIX и XX столетий на основе исследований оптических спектров *газов*, открытия *электрона* и *радиоактивности*. На первом этапе своего развития (первая четверть XX в.) атомная физика занималась главным образом выявлением строения *атома* и изучением его свойств. Опыты Э. Резерфорда по рассеянию α-частиц тонкой металлической фольгой (1908—1911) привели к созданию планетарной модели атома; используя эту модель, Н. Бор (1913) и А. Зоммерфельд (1915) разработали первую количественную теорию атома (см. *Атом*). Последующие исследования свойств электрона и атомов завершились созданием в середине 20-х гг. *квантовой механики* — физической теории, описывающей законы микромира и позволяющей количественно рассматривать явления, в которых участвуют микрочастицы (см. *Квантовая механика*).

Квантовая механика является теоретическим фундаментом атомной физики. В то же время атомная физика играет роль своеобразного «испытательного полигона» для квантовой механики. Представления и выводы квантовой механики, часто не согласующиеся с нашим повседневным опытом, проходят экспериментальную проверку в атомной физике. Ярким примером могут служить знаменитые опыты Франка — Герца (1913) и Штерна — Герлаха (1922); ниже остановимся на них подробнее.

К началу XX в. был накоплен богатый материал по оптическим спектрам атомов. Было установлено, что каждому химическому элементу соответствует свой линейчатый спектр, характеризующийся закономерным, упорядоченным расположением спектральных линий. Квантовая механика связывает наблюдаемые закономерности в спектре с системой энергетических уровней данного атома. В 1913 г. немецкие физики Дж. Франк и Г. Герц выполнили опыт, давший прямое экспериментальное подтверждение тому, что внутренняя энергия атома квантуется и поэтому может изменяться лишь дискретно, т. е. определенными порциями. Они измерили энергию свободных электронов, затрачиваемую на возбуждение атомов ртути. Основной элемент установки — стеклянный откачанный баллон с тремя впаянными электродами: катодом, анодом, сеткой (прообраз современного вакуумного триода). В баллоне находились пары ртути под давлением 1 мм рт. ст. Электроны, покинувшие катод, ускорялись в поле между катодом и сеткой (ускоряющее напряжение U) и затем тормозились в поле между сеткой и анодом (тормозящее напряжение U^1). На пути от катода к аноду электроны сталкивались с атомами ртути. Напряжение U^1 выбиралось значительно мень-

Спектры испускания натрия, водорода, гелия.



ше, чем U; поэтому от анода отталкивались только достаточно медленные электроны — те, которые потеряли энергию в результате неупругих столкновений с атомами ртути. В опыте измерялась сила анодного тока в зависимости от ускоряющего напряжения U. Экспериментальная кривая имеет ряд четких максимумов, отстоящих друг от друга на 4,9 В. Вид этой кривой объясняется так. При $U < 4{,}9$ В столкновения электронов с атомами ртути являются упругими (возбуждение атомов не происходит), поэтому сила тока плавно нарастает с увеличением U. По достижении значения $U = 4{,}9$ В начинаются неупругие столкновения, связанные с возбуждением атомов ртути; в результате сила тока резко падает. При дальнейшем повышении U ток снова нарастает до тех пор, пока напряжение не достигнет 9,8 В, когда электрон оказывается в состоянии возбудить два атома. При достижении 14,7 В электроны способны испытать три неупругих столкновения с атомами ртути и т. д. При напряжении 4,9 В электрон приобретает энергию 4,9 эВ. Таким образом вид кривой $I(U)$ показывает, что для возбуждения атома ртути необходима энергия, равная 4,9 эВ. Это и есть, очевидно, та самая порция энергии, которой атом ртути обменивается с электроном.

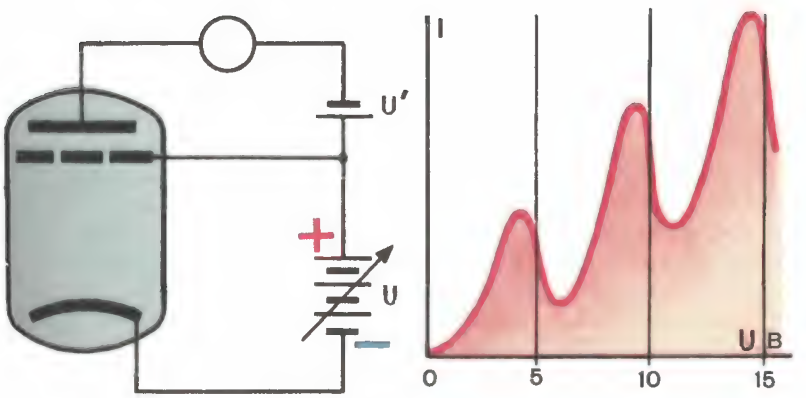
При более тщательной постановке опытов этого типа удалось обнаружить возбуждение следующих энергетических уровней атомов: для ртути это 6,7; 8,3 эВ и т. д. (10,4 эВ — потенциал ионизации). Наблюдение свечения газа показывает при этом появление полного спектра для атомов ртути.

Движущийся вокруг атомного ядра электрон можно уподобить элементарному электрическому току; он порождает магнитное поле. Магнитные поля различных электронов, складываясь, образуют магнитное поле атома. Для его характеристики вводится векторная величина, называемая *магнитным моментом*. Если электроны полностью заполняют ту или иную оболочку ($1s$, $2s$, $2p$ и т. д.), то их магнитные поля взаимно компенсируются; магнитные моменты соответствующих атомов равны нулю.

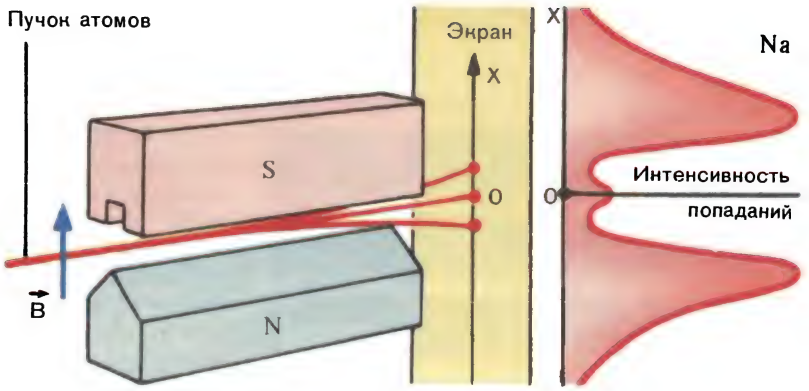
В 1922 г. в Германии О. Штерн и В. Герлах выполнили опыт, показавший, что магнитный момент атома пространственно квантуется. Они посылали пучок атомов, имеющих магнитный момент, сквозь неоднородное магнитное поле и исследовали отклонения атомов под действием этого поля. Степень и характер отклонения зависят от ориентации магнитного момента атома по отношению к направлению поля. Если бы в пучке находились атомы со всевозможными ориентациями магнитных моментов, то наблюдалось бы непрерывное угловое «размытие» первоначального пучка. На опыте же наблюдалось четкое расщепление пучка атомов на несколько пучков; это и означало, что магнитный момент атома пространственно квантуется — его проекция на направление магнитного поля может иметь лишь некоторые определенные (дискретные) значения.

Обратимся к распределению отклонений атомов натрия в неоднородном магнитном поле (оно получено в 1930 г.). Это распределение имеет два четких максимума. У атома натрия три заполненные оболочки ($1s$, $2s$, $2p$) и один $3s$-электрон. Электронное облако s-электронов сферически симметрично (см. *Атом*), поэтому их движение в поле ядра не приводит к появлению магнитного момента. Чтобы объяснить наблюдаемое расщепление пучка атомов натрия на две составляющие, необходимо принять, что у электрона есть собственный магнитный момент, не связанный с движением электрона

Опыт Франка — Герца.



Опыт Штерна — Герлаха.



вокруг ядра. Этот магнитный момент условно связывают с вращением электрона вокруг собственной оси и называют спиновым моментом (см. *Спин*). Магнитный же момент электрона, связанный с его движением вокруг ядра, называют орбитальным моментом. Итак, в случае атома натрия взаимно скомпенсированы как орбитальные, так и спиновые моменты электронов заполненных оболочек; орбитальный момент 3*s*-электрона равен нулю, а спиновый момент этого электрона обусловливает расщепление пучка атомов натрия в неоднородном магнитном поле. Тот факт, что наблюдается расщепление на два пучка, означает, что спиновый момент электрона имеет две проекции на направление магнитного поля.

В 30-х гг. нашего столетия начался новый этап в развитии атомной физики. В эти годы выяснилось, что природа взаимодействий, ответственных за процессы внутри атомного ядра и объясняющих стабильность либо *радиоактивность* ядер, является совершенно иной по сравнению с взаимодействиями, обусловливающими процессы, происходящие в электронных оболочках атома (см. *Единство сил природы*). В связи с этим из атомной физики выделилось отдельное научное направление, связанное с исследованиями физики атомных ядер; в 40-х гг. это направление оформилось в самостоятельную физическую науку — *ядерную физику*. Наконец, в 50-х гг. от ядерной физики отпочковалось направление, связанное с изучением систематики и взаимопревращений *элементарных частиц*, — физика элементарных частиц.

В итоге выявился вполне определенный круг вопросов, составляющих содержание современной атомной физики. Ее не интересуют процессы, происходящие в атомном ядре, равно как и взаимопревращения элементарных частиц. Атомная физика изучает процессы с участием атомов или ионов, притом только такие процессы, которые не приводят к каким-либо изменениям в атомных ядрах. Следовательно, речь идет о процессах, затрагивающих лишь электронные оболочки атомов. К подобным процессам относятся: изменения состояний электронов в атоме под действием внешних электрических или магнитных полей (так, под действием внешних полей происходит расщепление энергетических уровней атомов); поглощение и испускание атомами электромагнитного излучения (см. *Спектроскопия*, *Рентгеновские лучи*, *Фотоэффект*, *Лазеры*); столкновения атомов со свободными электронами, а также с другими атомами, ионами, молекулами (в результате столкновений с электронами или другими микрообъектами атомы могут возбуждаться, переходить из возбужденного состояния в менее возбужденное, превращаться в ионы, см. *Электрический разряд в газах*); взаимодействия электронных оболочек различных атомов, приводящие к образованию молекул и кристаллов. Все эти процессы обусловлены электромагнитным взаимодействием. Вероятности указанных процессов вычисляют, используя аппарат *квантовой механики*.

Современная атомная физика исследует также специальный тип атомов, называемых мезоатомами. Мезоатом возникает из обычного атома в результате замены одного из электронов мюоном (μ^-), антимезоном (π^-, K^-), антипротоном либо отрицательно заряженным гипероном (см. *Адроны*, *Лептоны*). Существуют и аномальные «водородные» атомы — позитроний, мюоний, у которых роль протона играют позитроны или положительно заряженные антимюоны (μ^+). Все эти атомы нестабильны; их время жизни ограничено временем жизни указанных выше частиц или процессами e^+e^-- и pp-аннигиляции. Мезоатомы образуются в процессе торможения частиц — в результате захвата отрицательно заряженных частиц кулоновским полем атомных ядер или при захвате позитронами и антимюонами атомных электронов. Опыты с различными аномальными атомами представляют большой интерес как для исследования свойств вещества, так и для изучения ядер и элементарных частиц.

Б

БЕТА-РАСПАД

Бета-распад становится возможным тогда, когда замена в *атомном ядре нейтрона* на *протон* (или, наоборот, протона на нейтрон) энергетически выгодна и получающееся новое ядро имеет меньшую массу покоя, т. е. большую энергию связи. Избыток энергии распределяется между продуктами реакции.

Бета-распад бывает трех видов:

1. Один из нейтронов (n) в ядре превращается в протон (p). При этом излучается электрон (e^-) и антинейтрино ($\bar{\nu}_e$) (см. *Нейтрино, Антивещество*). Это — β^--распад.

$$A(Z,N) \to A(Z+1, N-1) + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$(n \to p + e^- + \bar{\nu}_e),$$

где $A(Z, N)$ — обозначение ядра с числом протонов Z и нейтронов N. Заряд ядра увеличивается на 1. Простейший вид из всех видов β^--распада — распад свободного нейтрона, который тяжелее протона и поэтому нестабилен.

2. Протон, входящий в состав ядра, распадается на нейтрон (N), позитрон (e^+) и *нейтрино* (ν_e). Это — β^+-распад.

$$A(Z, N) \to A(Z-1, N+1) + e^+ + \nu_e$$
$$(p \to n + e^+ + \nu_e).$$

Заряд ядра уменьшается на 1. Процесс может происходить только в ядре; свободный протон не распадается таким образом.

3. Наконец, ядро может захватить ближайший из атомных электронов (электронный захват) и превратиться в другое ядро с зарядом на 1 меньше:

$$A(Z, N) + e^- \to A(Z-1, N+1) + \nu_e$$
$$(p + e^- \to n + \nu_e).$$

β-частица при этом не излучается.

Когда физики начали изучать β-распад, о существовании *нейтрино* (ν_e или $\bar{\nu}_e$), обладающего огромной проникающей способностью, ничего не было известно.

Загадка, с которой столкнулись экспериментаторы,— сплошной энергетический спектр электронов, излучаемых при β-распаде. В этом процессе на долю дочернего ядра приходится ничтожная часть освобождающейся энергии. Вся она идет на *электрон*, и поэтому все β-частицы должны были бы иметь одинаковую энергию E_0. А на опыте наблюдалась такая картина: испускались электроны любой энергии, вплоть до максимально возможной — E_0.

Физики предположили, что виноват источник: β-частицы теряют свою энергию, когда проходят сквозь его материал. Для проверки этой гипотезы несколько групп экспериментаторов поставили калориметрические опыты. Делались они так: радиоактивный источник помещали в калориметр с такими толстыми стенками, чтобы β-частицы в них полностью поглощались. Это позволило измерить всю энергию, выделяющуюся за определенное время.

Потом рассчитали энергию, приходящуюся на одну β-частицу. Экспериментаторы ожидали, что она окажется близкой к E_0, но всякий раз получали величину, приблизительно в 2 раза меньшую.

Выход из положения нашел швейцарский физик-теоретик В. Паули. Он высказал предположение, что при β-распаде испускается частица, обладающая несравненно большей проникающей способностью, чем электроны. Ее не могут задержать стенки калориметра, и она уносит с собой часть энергии. Так родилось представление о *нейтрино*.

Теория β-распада была создана в 1934 г. итальянским физиком Э. Ферми. В ней ученый предположил, что электрон и нейтрино рождаются в момент распада нуклона в ядре. Он ввел в теорию константу G, которая играла для β-распада такую же роль, что и заряд e для электромагнитных процессов, и вычислил ее величину на основании экспериментальных данных. Теория Ферми позволила рассчитать форму β-спектров и связать граничную энергию распада E_0 со временем жизни радиоактивного ядра. Нейтрино в этой теории имело заряд, равный нулю, и нулевую массу (во всяком случае, $m_\nu \lesssim m_e$).

В течение следующих лет теорию стремились видоизменить, дополнить и усложнить, поскольку казалось, что она слишком проста и не описывает всех опытных данных. Прошло несколько десятилетий, прежде чем физики убедились, что все эти дополнения основаны на ошибочных экспериментах, а путь, выбранный Ферми, правильный. Созданная сейчас теория объединенного слабого и электромагнитного взаимодействия включает его как первое приближение (см. *Четность, Нейтрино, Слабые взаимодействия*).

Приведем некоторые данные о бета-распаде ядер.

Граничная энергия β-частиц (E_0) — от нескольких КэВ до ~ 17 МэВ.

Время жизни ядер по отношению к β-распаду — от $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ с до $\sim 2 \cdot 10^{13}$ лет.

Пробег β-частиц в легких веществах — несколько сантиметров. Они теряют свою энергию на *ионизацию* и возбуждение атомов.

БИОФИЗИКА

Биофизика, или биологическая физика, — важное направление современной науки, возникшее на границе биологии с различными разделами физики. Основная задача биофизики состоит в изучении физических основ строения и функционирования живых систем. При исследованиях биологических объектов различной степени сложности, начиная от отдельных молекул и их комплексов и кончая клетками, их сообществами, тканями, органами, целостными организмами и популяциями, возникает целый комплекс сложных проблем. Их решение требует применения всего арсенала теоретических и экспериментальных методов современной физики, в том числе ряда разделов математической физики, теории информации, кибернетики, автоматического регулирования и других смежных направлений науки.

Исследуя мир живой материи, человек широко использует фундаментальные законы физики и, прежде всего, законы сохранения. Многие свойства биологических объектов и систем, несмотря на всю их сложность и специфичность, удается проанализировать, опираясь на физические модели, применяя законы механики, термодинамики, акустики, электромагнетизма, оптики. В результате возникло и интенсивно развивается новое научное направление — биофизика, которое находится как бы на стыке биологии и физики.

Биофизика — наука, возникшая на стыке физики и биологии,— решает важные практические задачи.

Ученые в лабораториях с помощью биофизических методов научного исследования изучают закономерности природы.

По современным представлениям в основе жизнедеятельности всех известных нам биологических объектов лежат законы природы, присущие и остальной *материи*. Однако в силу своей специфики и высокой сложности в биологических системах имеются свои качественно новые особенности, несводимые непосредственно к простым физическим процессам. Это относится к таким проблемам, как возникновение и эволюция жизни на нашей планете; естественный отбор; дифференцировка клеток и развитие многоклеточных, высокоорганизованных организмов из одной клетки; вопросы поведения индивидуумов и коллективов живых существ; качественное отличие человека от всех других представителей живой природы, связанное с его интеллектуальной и эмоциональной деятельностью, общественными явлениями и социальными проблемами. И тем не менее фундаментальные законы физики, несомненно, справедливы для всех биологических систем, и их применение открывает огромные перспективы для исследования самых сложных объектов природы — живых существ.

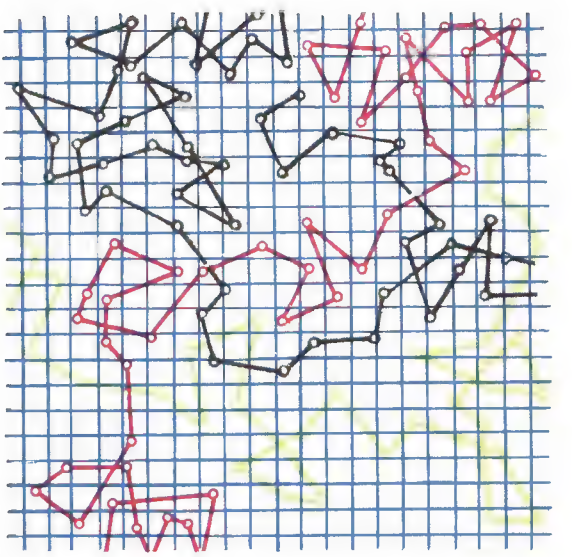
Биофизика вскрыла важные особенности взаимодействия вещества и энергии в биологических системах. Оказалось, что процессы жизнедеятельности подчиняются законам *термодинамики* открытых систем, с постоянным обменом вещества и энергии с окружающей данный организм средой. Живые системы, как правило, функционируют в условиях, далеких от термодинамического равновесия, что приводит к весьма необычным для неживой природы закономерностям изменения свободной энергии и *энтропии* (см. *Термодинамика*). Другими словами, жизнь — это процесс, динамическое состояние, которое обусловлено сложными взаимодействиями вещества, энергии и информации.

Биофизика показала полную справедливость для биологии таких фундаментальных законов физики, как законы сохранения и симметрии (см. *Симметрия законов природы*). Помимо этих общих подходов к биологическим явлениям с позиций современной физики биофизика решает широкий круг более частных проблем, имеющих большое теоретическое и прикладное значение. К ним следует отнести исследования структуры белков, нуклеиновых кислот и их комплексов, механизмов работы ферментов, структуры и функции мембран; физических основ биоэнергетики, фотосинтеза, молекулярных основ биологической подвижности; физических механизмов восприятия света, звука, механических воздействий, рецепторов вкуса и запахов; молекулярных механизмов действия ионизирующей радиации, электромагнитных полей радиочастотного и оптического диапазона, акустических волн; природы памяти и физических основ функционирования нервной системы и мозга; механизмов, лежащих в основе индивидуального развития и межклеточных взаимодействий; самоорганизации биосистем, вопросов биомеханики и управления в биосистемах.

Даже краткое перечисление проблем, изучаемых биофизикой, показывает их огромное многообразие и сложность. Для их успешного решения используются различные научные методы. На вооружении биофизики сегодня рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, радиоизотопы, радиоспектроскопия электронного и ядерного магнитного резонанса, оптическая спектроскопия, *масс-спектрометрия*, активационный анализ, различные методы радиоэлектроники и кибернетики, вычислительная техника, математическое моделирование и многое, многое другое.

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Траектории частиц гуммигута, совершающих броуновское движение в глицерине.



В 1827 г. английский ботаник Р. Броун наблюдал в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде. То, что он увидел, очень его удивило. Писал он об этом так: «При работе с частицами или зернами необычайно малой величины размером от одной четырехтысячной до одной пятитысячной доли дюйма (т. е. 5—6 мм) в длину, погруженными в воду, я наблюдал многие из них в явном движении... Эти движения были таковы, что после многих повторных наблюдений я убедился в том, что они возникают не от потоков жидкости и не от ее постоянного испарения, а принадлежат самим частицам». Броун также отметил, что частицы двигались непрерывно, описывая самые причудливые траектории; их движение носило ярко выраженный хаотический характер. Даже качественно объяснить причины броуновского движения удалось только через 50 лет. В то время в существование *атомов* и *молекул* очень многие не верили, во всяком случае прямых экспериментальных доказательств не было. Поэтому вначале предполагали, что частички двигались за счет присущей им «жизненной силы», поскольку они были органического происхождения. Однако, когда опыты Броуна были повторены многократно и на самых разных, в том числе неорганических, мельчайших частичках, оказалось, что эффект универсален и не зависит ни от каких внешних факторов, за исключением температуры. С увеличением температуры интенсивность движения броуновских частичек заметно возрастала.

Лишь в конце 70-х гг. прошлого века причину броуновского движения стали связывать с ударами молекул жидкости о поверхность взвешенной в ней частицы. Если бы частица была большой, то молекулы равномерно толкали бы ее со всех сторон и взвешенная частица оставалась бы на месте. Но маленькая частица имеет маленькую поверхность, и толчки не уравновешивают друг друга. Равнодействующая сил не равна нулю, а все время меняется по величине и направлению. В результате частица блуждает случайным образом по жидкости.

Первая количественная теория броуновского движения появилась в 1905 г. Ее автором был А. Эйнштейн, опубликовавший классическую работу «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты».

В своей работе Эйнштейн показал, что случайные блуждания броуновских частиц можно трактовать следующим образом: они участвуют в тепловом движении наравне с молекулами той среды, в которой они взвешены, обладая в среднем такой же кинетической энергией, но несравненно меньшей скоростью ввиду гораздо большей массы. Измерив смещение частицы за определенное время, зная ее радиус и *вязкость* жидкости, можно вычислить *число Авогадро*.

Экспериментальное подтверждение теории Эйнштейна явилось заслугой французского физика Ж. Перрена. Он решил изучить распределение микроскопических частичек в специально приготовленной эмульсии. Серию таких экспериментов Перрен с сотрудниками начал в 1906 г. Главная трудность заключалась в приготовлении эмульсии с частицами одинакового размера. После ряда неудач Перрену удалось получить такие частицы из гуммигута — смолистого вещества, добываемого из млечного сока некоторых деревьев, и мастики — одной из разновидностей смол. Частицы были взвешены в глицерине с добавкой 12% воды для достижения необходимой плотности.

Опыты заключались в следующем: капельку эмульсии помещали в плоскую кювету глубиной 0,1 мм, плотно закрывающуюся покровным стеклом. Положение частичек эмульсии через определенные промежутки времени наблюдали с помощью специального микроскопа. На рисунке изображены траектории трех частиц гуммигута. Кружочки отвечают положениям частиц через равные промежутки времени. Видно, что движения частиц совершенно случайны: протяженность каждого смещения произвольна, все направления движения непредсказуемы.

Проследив за движением нескольких тысяч частиц и подставив свои данные в формулу Эйнштейна, Перрен в результате довольно точно вычислил значение числа Авогадро.

В

ВАВИЛОВА — ЧЕРЕНКОВА ЭФФЕКТ

Изучая свечение раствора солей урана под действием γ-лучей радия, советский физик П. А. Черенков обратил внимание на то, что светится и сама вода, в которой солей урана нет. Оказалось, что при пропускании γ-лучей (см. *Гамма-излучение*) через чистые жидкости все они начинают светиться. С. И. Вавилов, под руководством которого работал П. А. Черенков, высказал гипотезу, что свечение связано с движением *электронов*, выбиваемых γ-квантами радия из *атомов*. Действительно, свечение сильно зависело от направления магнитного поля в жидкости (это наводило на мысль, что его причина — движение электронов).

Но почему движущиеся в жидкости электроны испускают свет? Правильный ответ на этот вопрос в 1937 г. дали советские физики И. Е. Тамм и И. М. Франк.

Электрон, двигаясь в веществе, взаимодействует с окружающими его атомами. Под действием его электрического поля атомные электроны и ядра смещаются в противоположные стороны — среда поляризуется. Поляризуясь и возвращаясь затем в исходное состояние, атомы среды, расположенные вдоль траектории электрона, испускают электромагнитные световые волны. Если скорость электрона v меньше скорости распространения света в среде c/n (n — показатель преломления), то электромагнитное поле будет обгонять электрон, а вещество успеет поляризоваться в пространстве впереди электрона. Поляризация среды перед электроном и за ним противоположна по направлению, и излучения противоположно поляризованных атомов, «складываясь», «гасят» друг друга. Когда $v > c/n$, атомы, до которых еще не долетел электрон, не успевают поляризоваться, и возникает излучение, направленное вдоль узкого конического слоя с вершиной, совпадающей с движущимся электроном, и углом при вершине $\theta = \arccos \frac{c}{nv}$. Возникновение светового «конуса» и условие излучения $v > c/n$ можно получить из общих принципов распространения *волн*.

Пусть электрон движется по оси OE (см. рис. 1) очень узкого пустого канала в однородном прозрачном веществе с показателем преломления n (пустой канал нужен, чтобы в теоретическом рассмотрении не учитывать столкновений электрона с атомами). Любая точка на линии OE, последовательно занимаемая электроном, будет центром испускания света. Волны, исходящие из последовательных точек O, D, E, интерферируют друг с другом и усиливаются, если разность фаз между ними равна нулю (см. *Интерференция*). Это условие выполняется для направления, составляющего угол θ с траекторией движения электрона. Угол Θ определяется соотношением: $\cos \Theta = c/nv$.

Действительно, рассмотрим две волны, испущенные в направлении под углом Θ к скорости электрона из двух точек траектории — точки O и точки D, разделенных расстоянием x. В точку B, лежащую на прямой BE, перпендикулярной OB, первая волна придет через время $\frac{OB}{c/n}$. В точку F, лежащую на прямой BE, волна, испущенная из точки D, придет в момент времени $x/v + \frac{DF}{c/n}$ после испускания волны из точки O. Эти две волны будут в фазе, т. е. прямая BE будет волновым фронтом, если эти времена равны: $\frac{OB}{c/n} = \frac{x}{v} + \frac{DF}{c/n}$. Так как $OB = OE \cos \Theta$, а $DF = (OE - x) \cos \Theta$, условие равенства времен дает $\cos \Theta = c/nv$. Во всех направлениях, для которых $\cos \Theta \neq c/nv$, свет будет гаситься из-за интерференции волн, испущенных из участков траектории, разделенных расстоянием Δ. Величина Δ определяется очевидным уравнением: $\frac{\Delta \cos \Theta}{c/n} - \frac{\Delta}{v} = \frac{T}{2}$, где T — период световых колебаний. Это уравнение всегда имеет решение, если $\cos \Theta \neq c/nv$.

Если $v < c/n$, то направления, в котором излученные волны, интерферируя, усиливаются, не существует, $\cos \Theta$ не может быть боль-

Рис. 1. Механизм образования волнового фронта при движении быстрого электрона ($v > c/n$) в среде.

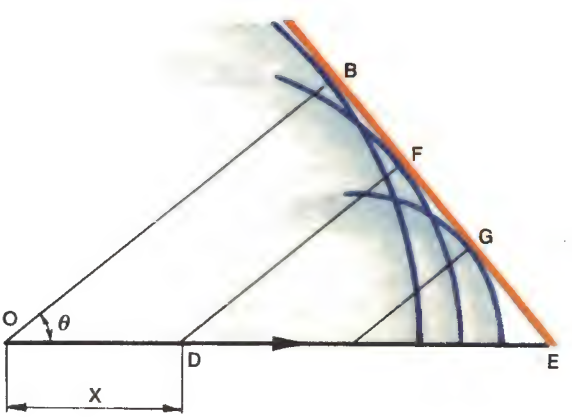
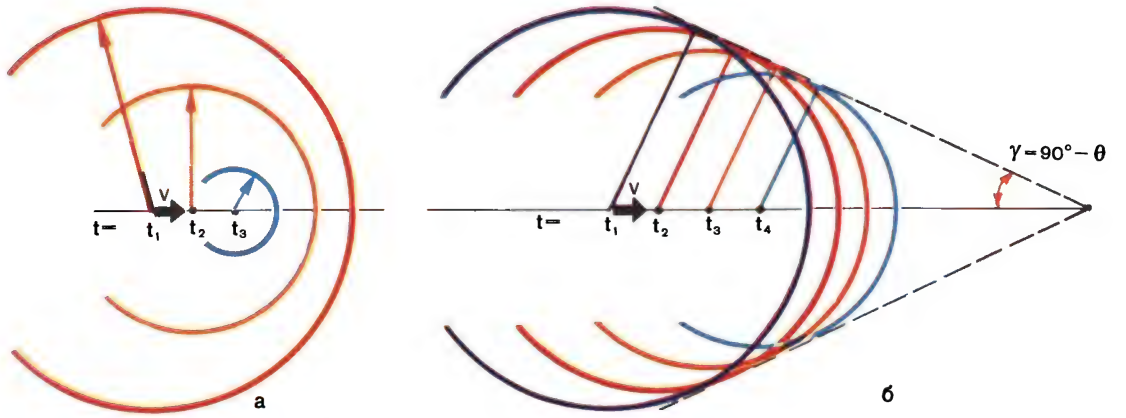


Рис. 2. Распространение звуковых волн и формирование ударной волны при движении тела в среде с дозвуковой (*а*) и сверхзвуковой (*б*) скоростью.



ше 1. Излучение наблюдается только, если $v > c/n$.

На опыте электроны летят в конечном телесном угле, с некоторым разбросом по скоростям, и в результате излучение распространяется в коническом слое около основного направления, определяемого углом $\Theta = \text{arc cos } c/vn$.

В нашем рассмотрении мы пренебрегли замедлением электрона. Это вполне допустимо, так как потери на излучение Вавилова — Черенкова малы и в первом приближении можно считать, что теряемая электроном энергия не сказывается на его скорости и он движется равномерно. В этом принципиальное отличие и необычность излучения Вавилова — Черенкова.Обычно заряды излучают, испытывая значительные ускорения.

Электрон, обгоняющий свой свет, сходен с самолетом, летящим со скоростью, большей скорости звука. В этом случае перед самолетом тоже распространяется коническая ударная звуковая волна. (см. рис. 2).

Потери энергии на излучение у быстрых заряженных частиц почти в тысячу раз меньше потерь на *ионизацию*. Казалось бы, что столь незначительную энергию трудно использовать в практических приложениях. Однако по излучению Вавилова — Черенкова с помощью специальных детекторов удается измерить скорость, энергию, заряд быстрых частиц.

В 1958 г. за открытие и толкование этого эффекта советским физикам П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике.

ВАКУУМ ФИЗИЧЕСКИЙ

Казалось бы, в этих двух словах есть противоречие: вакуум — пустота, а пустота не может быть физической или нефизической. Ведь пустота — это когда совсем ничего нет!

Так говорит нам повседневный опыт, основанный на явлениях классической физики. Однако физика микромира описывается *квантовой механикой* и *теорией относительности*, и эти две теории не допускают существования пустоты. Если откачивать воздух из замкнутого сосуда, то в принципе можно удалить все вещество, но при этом все-таки не получится классическая пустота.

Что же останется в пустом сосуде? Наука утверждает: в вакууме имеются квантовые *флуктуации* полей и виртуально рождаются частицы.

Вакуум — это состояние с наименьшей энергией при отсутствии вещества. Но отсутствие вещества еще не означает отсутствия частиц. Дело в том, что число частиц не сохраняется в реакциях. Сохраняются энергия, электрический, барионный (см. *Адроны*) и лептонный (см. *Лептоны*) заряды, но число частиц может меняться.

Если приложить достаточно энергии, из вакуума можно рождать частицы. Дело в том, что энергия может переходить в поле, а поле — в частицы (см. *Поля и частицы*). В этом отношении вакуум похож на *диэлектрик*, а рождение частиц напоминает пробой диэлектрика в сильных полях.

Ну, а если не прикладывать энергии и рассматривать свойства чистого вакуума? Казалось бы, эти свойства никак не связаны со свойствами частиц, рождающихся из вакуума в присутствии источников энергии. Так было бы в классической механике, но в квантовой механике это не так. Известное *соотношение неопределенностей* $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ приводит к тому, что на короткое время $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$ любая система может перейти в состояние, отличающееся на ΔE по энергии.

Такие переходы называются виртуальными. Так как по теории относительности энергия может переходить в массу, то виртуальные переходы соответствуют рождению частиц на короткое время. Поскольку $E = mc^2$,

то из соотношения неопределенностей находим, что частицы массы m виртуально рождаются на время $\hbar/mc^2$. Для *протона* это составит всего около 10^{-24} с.

Каковы же физические эффекты, вызываемые виртуальными частицами? В *атомной физике* эти эффекты довольно незначительны. Например, уровни энергии электрона на атомной оболочке сдвигаются на доли процента из-за взаимодействия с виртуальными *фотонами*; закон Кулона искажается на малых расстояних из-за поляризации вакуума (т. е. виртуального рождения пары электрон — позитрон, которые своими полями экранируют исходное поле).

Однако чем более мелкие частицы рассматриваются, тем бóльшую роль играет окружающий их вакуум со своими виртуальными частицами. Скажем, в ядерном веществе протоны имеют меньшую массу, чем в вакууме, где к этой массе добавляется масса «налипших» виртуальных π-мезонов. В ядерном веществе эти виртуальные мезоны расталкиваются протонами.

На уровне *кварков* свойства вакуума уже играют решающую роль. Невозможность существования свободных кварков, по всей вероятности, связана именно с колоссальными изменениями, которые одиночный кварк вызывает в вакууме. Грубо говоря, глюонное поле кварка выталкивается вакуумом, как это происходит с магнитным полем в сверхпроводнике. В результате поле кварка сжимается в трубку, аналогичную магнитным вихрям в сверхпроводнике (см. *Кварки, Сильные взаимодействия*). Эта трубка для свободного кварка имела бы бесконечную протяженность и несла бы бесконечную энергию. Поэтому кварки и не могут существовать в свободном состоянии (по теории относительности они были бы бесконечно тяжелыми). На самом деле происходят «разрывы» трубки, на концах этих «разрывов» возникают кварк-антикварковые пары, и в результате при попытке «выбить» кварки из *адронов* образуются ливни из нескольких адронов — «адронные струи».

Правда, в отличие от сверхпроводника, где известно, что́ сжимает поле в трубку (куперовские пары) (см. *Сверхпроводимость*), в случае вакуума это не вполне ясно. Не удается выделить виртуальные частицы, играющие здесь доминирующую роль. Однако не вызывает сомнений, что именно виртуальные процессы в вакууме приводят к необычным свойствам кварков.

На сверхмалых расстояниях свойства вакуума еще более загадочны. Неожиданно возникает связь квантовых эффектов с гравитационными (см. *Тяготение*). Сверхтяжелые виртуальные частицы создают вокруг себя заметное гравитационное поле, которое начинает искажать геометрию пространства. Не вдаваясь в детали этого, еще не до конца изученного эффекта, можно только оценить порядок величин масс таких виртуальных частиц и соответствующих комптоновских длин волн (см. *Комптона эффект*): $m \sim \sqrt{\hbar c/G}$, $\lambda \sim \frac{\hbar}{mc}$, где G — постоянная тяготения. Подставляя числовые значения, находим: $m \sim 10^{19}$ ГэВ, $\lambda \sim 10^{-33}$ см. Пока еще невозможно представить себе какие бы то ни было научные эксперименты при столь больших энергиях и на столь малых пространственных масштабах.

ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ

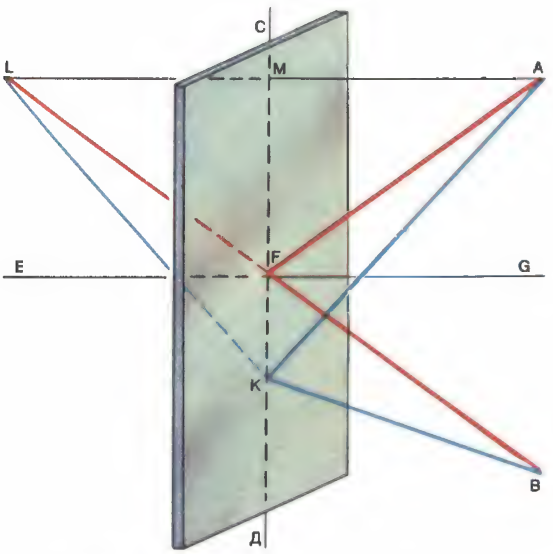
Всякая наука стремится свести к минимуму число принципов или законов, лежащих в ее основе. Значение вариационных принципов заключается в том, что каждый из них заменяет несколько частных законов. Например, принцип Ферма́ эквивалентен законам отражения и преломления света. Принцип наименьшего действия — законам *механики*.

Открытие вариационных принципов имеет многовековую историю. Герон Александрийский (I в.) — древнегреческий ученый, популяризатор науки, изобретатель различных механизмов (гидравлических машин, пожарного насоса, автомата для продажи «священной» воды, паровой турбины и т. д.) сформулировал следующий оптический постулат: «Скажу, что из всех лучей, падающих из данной точки и отражающихся в данную точку, минимальны те, которые от плоских и сферических зеркал отражаются под равными углами». Для плоского зеркала справедливость этого утверждения Герон доказал с помощью простого геометрического построения. Пусть (рис. 1) A — источник света, B — глаз, CD — зеркало, AFB — действительный путь света, AKB — какой-либо другой возможный путь света, испытавшего отражение. Продолжим BF до встречи в L с продолжением AM. Так как угол падения AFG равен углу отражения GFB, то $AM = ML$ и, следовательно, $AF = LF$. Тогда $AF + FB = BF + FL < BK + KL = AK + KB$, т. е. AFB — кратчайший путь.

Для сферических зеркал постулат Герона не всегда верен. На рис. 2а изображен случай, когда путь света минимален, а на рис. 2б — максимален.

В XVII в. знаменитый французский математик П. Ферма́ сформулировал принцип, представляющий обобщение утверждения Герона: свет всегда идет по пути, требующему для своего прохождения минимального времени. Принцип Ферма для случая отражения света, очевидно, эквивалентен постулату Герона. Однако для случая преломления света

Рис. 1. Геометрическое построение Герона.



на границе двух сред принцип Ферма сохраняет свою справедливость, тогда как постулат Герона становится неприменимым.

П. Ферма считал скорость света меньшей в более плотной среде, чем в менее плотной. Французский ученый Р. Декарт исходил из противоположного соотношения скоростей и вывел закон преломления, рассматривая свет как поток частиц, подчиняющихся законам механики. Между Ферма и Декартом шла острая дискуссия. Правота П. Ферма в научном споре с Р. Декартом была доказана лишь в XIX в., после проведения их соотечественником Л. Фуко опытов по прямому измерению скорости света в различных средах. Эти опыты подтвердили волновую природу света.

На первый взгляд получение действительных изображений в оптике противоречит принципу Ферма. Между точкой A и ее изображением A^1 сквозь линзу проходит бесконечное число лучей различной формы и длины (рис. 3). Однако время прохождения светом всех лучей одно и то же. В стекле линзы свет идет медленнее, чем в воздухе, поэтому, хотя крайние лучи имеют бóльшую длину, чем центральные, время их прохождения выравнивается. Из требования равенства времен прохождения крайних и центральных лучей можно непосредственно получить формулу линзы, не используя закон преломления света.

Вариационные принципы механики ведут начало своей истории с конца XVII в., когда швейцарский ученый И. Бернулли опубликовал работу «Новая задача, к разрешению которой приглашаются математики». Это была задача о брахистохроне, или кривой наискорейшего ската: даны две точки в вертикальной плоскости; найти вид кривой линии, спускаясь по которой тяжелое тело прошло бы путь между этими точками за наименьшее время. И. Бернулли в своем решении исходил из аналогии между распространением луча света в среде с непрерывно изменяющимся по высоте показателем преломления и движением тела под действием силы тяжести. Луч имеет в такой среде криволинейную форму, аналогичную траектории движения тела. Работа И. Бернулли послужила началом весьма плодотворных исследований аналогии между *оптикой* и *механикой*, приведших позднее к результатам, положенным в основу современной физики.

Следующий шаг по пути развития вариационных принципов механики сделал в первой половине XVIII в. французский ученый П. Мопертюи. Подобно Декарту, он рассматривал свет как поток частиц, подчиняющихся законам механики, и выдвинул вариационный принцип механики — п р и н ц и п н а и м е н ь ш е г о д е й с т в и я. Согласно этому принципу, «путь, которого он (свет) придерживается, является путем, для которого количество действия будет

Рис. 2а. Путь света минимален.

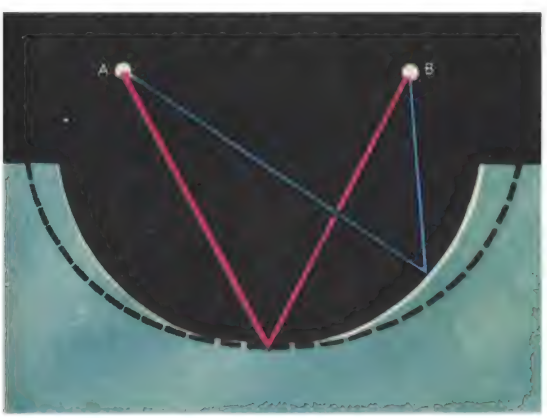


Рис. 2б. Путь света максимален (пунктирная кривая — эллипс).

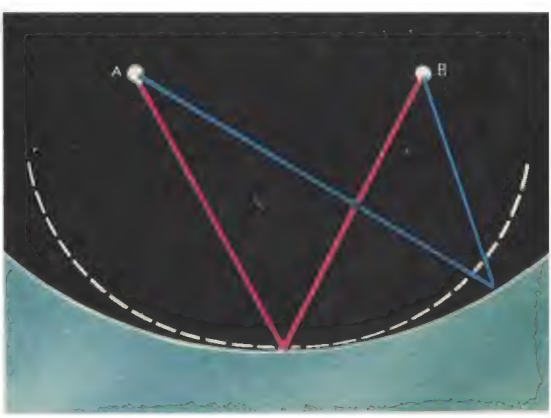
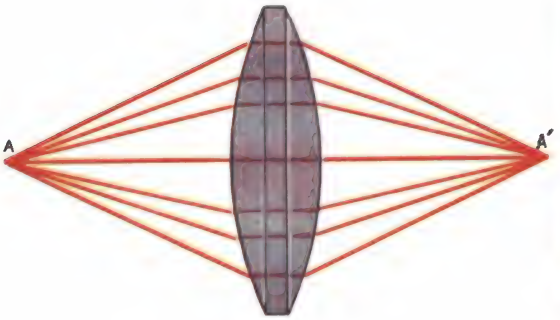


Рис. 3. Действие линзы.



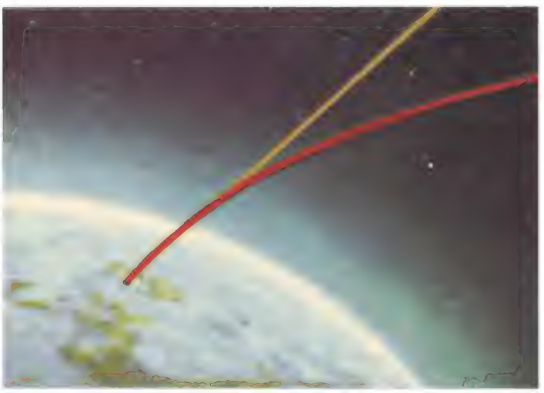
наименьшим». Под *действием* Мопертюи понимал произведение скорости на длину пути. Из принципа минимальности действия для частиц света он вывел закон отражения и закон преломления, получив при этом отношение скоростей света в средах, совпадающее с результатом Декарта и обратное тому, что было у Ферма.

Выдающиеся математики и механики Л. Эйлер, Ж. Лагранж и У. Гамильтон придали понятию *действия* содержание, используемое и сейчас. Произведение скорости на длину пути, введенное Мопертюи, можно преобразовать в произведение квадрата скорости на время, заменив путь произведением скорости на время. Если ввести еще постоянный множитель, равный массе тела, деленной на 2, то получим произведение кинетической энергии на время, что и стало определением действия при отсутствии сил. При наличии сил действие равно среднему значению разности между кинетической и потенциальной энергией, умноженному на время движения. Был создан специальный математический аппарат для решения задач, связанных с применением принципа Ферма, или принципа наименьшего действия. Этот аппарат получил название вариационного исчисления, а соответствующие принципы стали называть вариационными принципами.

В вариационном исчислении речь идет о величинах, зависящих от вида той или иной функции, а не от значений тех или иных переменных. Например, время прохождения света между двумя точками зависит от всей формы луча, определяемой видом функции, связывающей координаты. Вариационное исчисление дает способ нахождения вида функции, соответствующей минимальному или максимальному значению варьируемой величины. Для этого надо потребовать равенство нулю изменений значения варьируемой величины при бесконечно малых изменениях формы функции. Оказалось, что вариационные принципы можно ввести и в учение о теплоте, и в *электродинамику*.

Еще нидерландский ученый XVII в. Х. Гюйгенс обратил внимание на то, что принцип

Рис. 4. Искривление луча в атмосфере. Звезда видна в направлении, указанном желтой линией.



Ферма является следствием волновых свойств света. Австрийский физик XX в. Э. Шрёдингер, один из создателей *квантовой механики*, рассмотрел распространение света в среде с плавно убывающим с высотой показателем преломления. В такой среде (например, в земной атмосфере) лучи приобретают криволинейную форму (рис. 4), удовлетворяющую принципу Ферма. Искривление лучей можно просто объяснить поворотом волновых поверхностей за счет большей скорости перемещения их верхних частей по сравнению с нижними. Световые лучи представляют собой нормали к волновым поверхностям и поворачиваются вместе с ними. Внешне это выглядит так, как будто луч «выбирает» путь, соответствующий точкам среды, где скорость света больше. Интересно отметить, что если световой луч в такой среде приобретает горизонтальное направление, то его дальнейшее искривление нельзя объяснить, пользуясь законом преломления. Это можно легко сделать, рассматривая распространение волновых поверхностей. Принцип Ферма при этом не нарушается.

Понятие действия приобрело в физике особое значение после введения в 1900 г. немецким физиком М. Планком, основателем квантовой физики, кванта действия, равного фундаментальной постоянной h. Наличие h в каком-либо физическом соотношении свидетельствует о том, что оно может быть выведено только из квантовых представлений. Сопоставление принципов Ферма и Мопертюи натолкнуло французского ученого Л. де Бройля в 1920-х гг. на идею о наличии у частиц вещества волновых свойств, что вскоре было подтверждено на опыте. Формула длины волны, выведенная де Бройлем, содержит h.

Э. Шрёдингер провел глубокий анализ вариационных принципов оптики и механики и ввел уравнение, носящее его имя.

Значение вариационных принципов заключается в том, что, зная действие и пользуясь этими принципами, можно вывести уравнения движения для любой системы.

ВЕРОЯТНОСТЬ В ФИЗИКЕ

Понятие *вероятности* появилось в физике в связи с развитием *кинетической теории газов*. Когда было установлено, что газ состоит из большого числа движущихся частиц, то возник вопрос о том, с какими скоростями движутся частицы газа — его *молекулы*.

Английский физик Дж. Максвелл построил первую теорию идеального газа, в которой состояние газа задавалось не положением и скоростью каждой частицы, а функцией распределения — вероятностью найти молекулу с заданной скоростью в заданном месте сосуда. Для того чтобы упростить изложение, предположим, что сосуд разбит на маленькие кубические ячейки с ребром, например, в 1 мм и что нас интересуют не точные координаты молекулы, а лишь то, в какой ячейке она находится. Скорости мы тоже будем задавать не точно, а считая, например, все скорости молекулы, двигающейся здесь вдоль оси OX, отличающиеся не более чем на 1 мм/с, одинаковыми. Тогда и скорости представляется возможным задавать ячейками, на которые можно разбить трехмерную диаграмму; по осям ее отложены компоненты скоростей v_x, v_y, v_z, а точка изображает скорость частицы. Если на молекулы газа не действуют никакие силы, например сила тяжести или электрическое поле, то молекула будет одинаково часто бывать в любом месте сосуда. Мы говорим, что вероятность найти молекулу в любой ячейке одна и та же. Обозначим эту вероятность через w_i. Очевидно, что сумма w_i, взятая по всем ячейкам, равна 1, так как вероятность найти молекулу в какой-либо ячейке равна 1. Если в сосуде находится N молекул, то в одной ячейке будет находиться в среднем w_iN молекул. w_i не зависит от номера ячейки; i — плотность газа, постоянная вдоль сосуда.

Совсем иначе выглядит вероятность найти молекулу с заданной скоростью или вероятность найти точку в заданной ячейке на диаграмме скоростей.

Так как энергия газа — E Джоулей — определена, то, грубо говоря, на каждую молекулу приходится примерно E/N Джоулей, и в газе должно быть мало молекул, энергия которых сильно отличается от этой величины. Клетки на диаграмме скоростей не равноправны, и распределение по скоростям не равновероятно. Такое распределение вероятностей и нашел Максвелл.

Из теории Максвелла следовало, что большая часть молекул газа имеет скорость $v^* = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}$, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, m — масса молекул. Это значение называют наиболее вероятной скоростью.

Понятие *вероятности* оказалось очень плодотворным. С ее помощью можно рассчитывать различные процессы, в которых участвуют много частиц и в которых роль отдельных частиц становится незаметной. Это такие процессы, как *теплопроводность*, перемешивание — *диффузия*, химические реакции и многие другие. Их изучает *статистическая физика*.

До создания *квантовой механики* считалось, что появление вероятностей связано обычно с большим числом частиц, координаты и скорости которых практически нельзя измерить.

Оказалось, однако, что даже для одной определенной частицы нельзя точно измерить координату и импульс одновременно и что результат опыта можно предсказать только в вероятностной форме.

Так как нет возможности точно измерить траекторию частицы, значит, нельзя и дать точный ответ на вопрос о том, на какой угол отклонится летящий *протон* в поле *атомного ядра*. Можно лишь указать вероятность его отклонения на тот или иной угол. Нельзя сказать также, когда распадается определенный радиоактивный *атом*, можно лишь указать вероятность того, что он распадается через t секунд. Известно, что число атомов уменьшается по закону $N_t = N_0e^{-\lambda t}$, если при $t = 0$ было N_0 атомов. Постоянная λ в этой формуле называется постоянной распада (см. *Радиоактивность*). Таким образом, хотя и нельзя установить, какие именно атомы распадутся, утверждение о законе распада большого числа атомов оказывается вполне определенным.

Вероятности появляются еще в одном разделе физики — в теории измерений. Никакое измерение не дает абсолютно точного значения измеряемой величины. Точное значение отличается от измеренного, и теория может лишь оценить вероятность того или иного отклонения. Оценка вероятности ошибки из анализа совокупности повторных измерений — важная задача *экспериментальной физики*.

В таблицах пишут, например, что скорость света равна 2,997924580 (1,2)$\cdot 10^8$ м/с; величина в скобках называется стандартным отклонением.

В данном случае из теории вероятности следует, что истинная скорость света не может отличаться от написанной более чем на 1,2 единицы в последнем знаке с вероятностью 68,3%.

Дело в том, что в любом опыте существует большое количество неучтенных факторов. В случае скорости света такими факторами могут быть непостоянство температуры, неточность в измерении длины волны и т. д., но они могут сказываться лишь в восьмом знаке после запятой. Степень достоверности этого утверждения и оценивается вероятностью.

Теория вероятности очень важна при вычислении достоверных значений основных физических величин.

ВОЛНОВОД

Волноводом называют канал, по которому распространяются *волны* той или иной природы. В зависимости от типа распространяющихся волн волноводами могут быть трубы, стержни, струны — для звуковых волн (см. *Звук*), системы линз и стеклянные трубки — для света, диэлектрические стержни и металлические трубы определенных сечений — для *электромагнитных волн* сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ).

Простейший акустический волновод — это, например, «поющая труба»: при распространении по водопроводной трубе звуковой волны дребезжание раздается во всех квартирах, связанных одним водопроводным стояком. Зная, что скорость звука в воде составляет около 1500 м/с, и оценивая частоту слышимой обычно звуковой волны примерно в 500 Гц, можно найти, что соответствующая длина волны намного превышает диаметр водопроводной трубы и поэтому волна, идущая по трубе, является одномерной. Еще один пример волновода с одномерным распространением звуковой волны — переговорные трубки на судах.

Однако наличие резкой границы между внутренней и внешней средами оказывается совершенно необязательным условием для передачи акустической волны на большие расстояния. Акустический волновод может возникнуть и в средах, между которыми имеется плавный (а не резкий) переход в свойствах распространения звука. Примерами таких волноводов в гигантских масштабах могут служить *атмосфера*, океан.

В океане плотность и температура воды меняются с глубиной таким образом, что скорость звука на некоторой глубине оказывается минимальной. Звуковые волны, подобно световым, могут претерпевать полное внутреннее отражение при переходе из среды с меньшей в среду с большей скоростью звука. Поэтому вблизи глубины, где скорость звука минимальна, может образоваться волновод, по которому звуковые волны будут распространяться на сотни и тысячи километров.

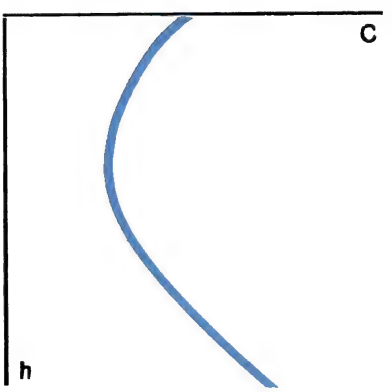
При определенных условиях на столь же большие расстояния могут переноситься и изображения различных предметов в атмосфере — так называемые сверхдальние миражи. По-видимому, это явление обусловлено неоднородностью показателя преломления воздуха и возникновением благодаря этому в атмосфере гигантских светопроводов. Возможно также, что роль своеобразной границы такого светопровода играет *ионосфера* (слои ионизированных газов на высоте $\sim$ 100 км), которая может отражать световые волны.

Огромное развитие в последнее время получили волноводы в *оптике*. До недавнего времени использовались только линзовые световоды, в которых луч распространялся по трубе, где через каждые 50—100 м его расхождение корректировалось собирающей линзой. Начиная с 1950-х гг. стала бурно развиваться новая область — волоконная оптика. Волоконный световод представляет собой тончайшую стеклянную нить с сердцевиной радиуса $r \sim 1 \div 10$ мкм, с коэффициентом преломления N и оболочкой радиуса $R \sim 10 \div 100$ мкм, с коэффициентом преломления $n < N$. При прохождении светового луча по такой системе он испытывает полное внутреннее отражение на границе между сердцевиной и оболочкой и распространяется вдоль нити. Из множества таких нитей набираются кабели, которые находят широкое применение в самых различных областях науки и техники. Так, в медицине с помощью гибких волоконных световодов врачам удается осветить и визуально изучить поверхности внутренних органов, которые ранее были совершенно недоступны непосредственному исследованию.

Световоды используются и при конструировании современных электронных вычислительных машин. Обеспечивая связь между различными устройствами, они помогают освободить ЭВМ от обилия электрических проводов, которые неизбежно наводят посторонние сигналы. Ученые рассчитывают, что вскоре световоды придут на смену и кабелям связи, а это коренным образом изменит способы передачи информации на дальние расстояния.

В радиолокации, сверхвысокочастотной электронике и других областях техники решается важная проблема передачи *электромагнитных волн* большой мощности в сверхвысокочастотном диапазоне с одного места в другое, например от передатчика к антенне и наоборот. Для этой цели используются радиоволноводы, представляющие собой диэлектри-

Зависимость скорости звука в океане от глубины (схема).



ческие каналы, обычно цилиндрической формы; их боковая поверхность служит границей раздела двух сред, и при переходе через нее резко меняются диэлектрическая (ε) или магнитная (μ) проницаемость и электропроводность. Характерные длины волн, обычно передаваемые посредством радиоволноводов, составляют десятки сантиметров.

ВОЛНЫ

Когда произносят слово «волна», обычно представляют себе какое-то движение. Если бросить камень в воду, то по поверхности воды побежит волна (рис. 1). Однако при распространении волны частички воды остаются на месте и совершают лишь колебательное движение (в этом легко убедиться, наблюдая, например, за веткой, плавающей на поверхности воды).

Волной называют распространение в пространстве изменения состояния.

Изменение состояния в физике означает изменение значения какой-либо физической величины. Например, при распространении звуковых волн в каждой точке пространства изменяются с течением времени деформация (происходит сжатие — разрежение), в случае *электромагнитной волны* — значения напряженности электрического и магнитного полей, тепловой волны — температуры и т. д. Если изменение величины со временем в каждой точке пространства происходит по гармоническому закону (см. *Колебания*):

$$a = a_0 \cos(\omega t + \delta), \qquad (1)$$

то говорят, что распространяется монохроматическая волна частоты ω. При этом фаза колебаний δ меняется от точки к точке.

Колебания в каждой следующей точке повторяют колебания в предыдущей точке, но со сдвигом по времени. Если расстояние между точками равно x, то сдвиг во времени равен x/c (это время необходимо волне для прохождения со скоростью c пути x). Соответствующее значение сдвига фазы

$$\delta(x) = (x/c)(2\pi/T),$$

так как при сдвиге во времени на период колебания T аргумент косинуса должен измениться на 2π (при этом колебания происходят синхронно, в такт). Таким образом, изменение физической величины a в пространстве и времени при распространении монохроматической волны происходит по закону:

$$a(x,t) = a_0 \cos(\omega t + kx), \qquad (2)$$

где величину $k = 2\pi/cT = \omega/c$ называют волновым числом.

Длина волны λ — это минимальное расстояние между точками, колебания в которых происходят в фазе. Очевидно, что

$$\lambda = cT = 2\pi/k$$

Волны бывают продольные и поперечные. Это зависит от направления вектора, описывающего колебания физической величины в волне. Если вектор параллелен направлению распространения волны (как, например, вектор смещения частиц в звуковой волне сжатия — разрежения), то волна про-

Рис. 1. Распространение волн от упавшего в воду камня.

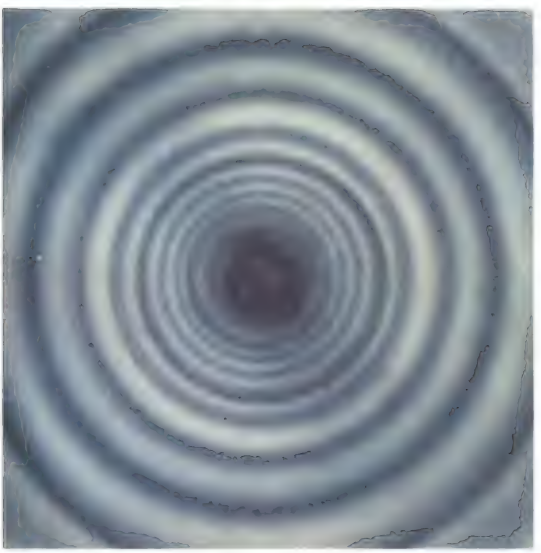
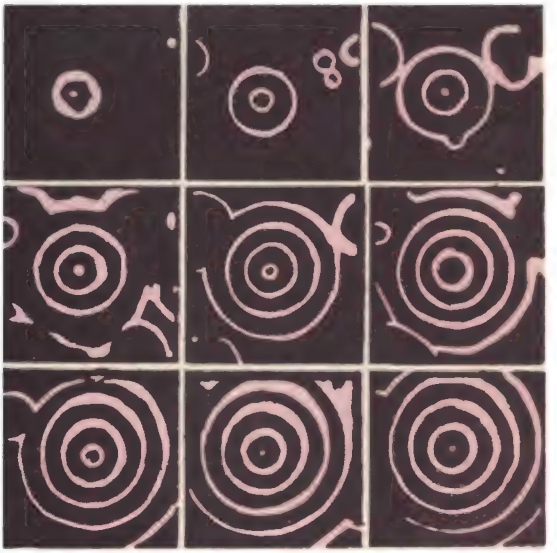


Рис. 2. Система волн, возбуждаемых при движении по глубокой воде.

Рис. 3. Волны, возникающие при химических реакциях.



дольная. Наоборот, когда вектор перпендикулярен направлению распространения волны (как, например, векторы напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне), то волна поперечная.

Формула (2) описывает плоскую монохроматическую волну, распространяющуюся вдоль оси x. Фронт волны (поверхность, на которой колебания происходят в одинаковой фазе) — это плоскость, перпендикулярная оси x. В пространстве также могут распространяться другие типы волн: сферические, когда фронт волны — сфера, цилиндрические и т. д. Фронт волны может принимать самые необычные формы. На фотографии (рис. 2) показана система волн, возбуждаемая кораблями, идущими параллельными курсами.

Необычные волны были недавно открыты при химических реакциях в тонких слоях вещества. Такие волны зарождаются на случайных неоднородностях, и их взаимодействие обусловливает причудливые картины фронта (рис. 3).

Очень важный тип волны (волновой пакет) получается при сложении монохроматических волн разной частоты.

Если, например, сложить монохроматические волны одинаковой амплитуды с частотами, лежащими в интервале $\Delta\omega$ возле основной частоты, то из-за *интерференции* волны гасят друг друга почти во всем пространстве. Они усиливают друг друга только в ограниченной области. Эта область с большой интенсивностью волны не стоит на месте, а движется в пространстве, образуя сигнал. Длительность сигнала Δt и набор частот монохроматических волн, из которых он состоит, связаны фундаментальным соотношением:

$$\Delta\omega \cdot \Delta t \approx 2\pi.$$

Чем короче сигнал, тем больший набор частот он содержит.

ОПЫТЫ СО СТРОБОСКОПОМ

Из-за инерции нашего зрения, а она проявляется в том, что зрительное ощущение сохраняется в течение нескольких долей секунды, мы не можем заметить отдельные положения быстро вращающегося или колеблющегося тела. Здесь может помочь либо скоростная киносъемка, либо стробоскоп. Название этого прибора составлено из двух греческих слов: «стробос» — «вращение» и «скоп» — «наблюдение» — и полностью соответствует его назначению.

Стробоскоп стал верно служить физикам с первой половины XIX в., а сам стробоскопический эффект был известен ученым гораздо раньше. Он состоит в следующем. Будем освещать вращающееся или колеблющееся тело не непрерывно, а отдельными, короткими вспышками. Частоту этих вспышек можно подобрать так, что мы будем видеть тело в одном и том же положении. Это произойдет, когда период вращения тела совпадает с промежутком времени между вспышками. При достаточно большой частоте вращения тела (и вспышек стробоскопа) глаз будет постоянно сохранять это зрительное ощущение за время между вспышками, и мы как бы «остановим» тело. Когда же частота вспышек стробоскопа немного отличается от частоты вращения тела, то мы будем видеть тело в несколько смещенном положении по отношению к положению в момент предыдущей вспышки. Сливаясь вместе, отдельные изображения дадут замедленную картину движения.

Со стробоскопом можно провести дома много интересных опытов, а сделать его относительно просто. Нужно иметь яркий источник света, дающий параллельный пучек, например фонарь или диапроектор. Перед объективом диапроектора устанавливается картонный диск с прорезями (диаметр диска 30 ÷ 40 см, диаметр отверстий соответствует размеру объектива, число их 10 ÷ 20). Диск надо укрепить на оси электрического моторчика, применяемого для различных игрушек и моделей.

Чтобы регулировать скорость вращения мотора, в его цепь кроме батарейки включают переменное сопротивление (~40 Ом). Теперь свет на экране будет вспыхивать с частотой $\nu = n \cdot k$, где n — число оборотов диска, а k — число прорезей в нем.

Первые опыты можно провести с вентилятором или пластинкой на проигрывателе. Направив свет на венти-

В определенных условиях в средах могут распространяться уединенные волны (например, цунами в океане), которые перемещаются в пространстве на большие расстояния практически без затухания. Такие волны называют *солитонами*; они играют важную роль при описании волновых процессов в *плазме,* твердом теле, *элементарных частицах*.

ВРЕМЯ

Для физика определить какую-либо из основных физических величин означает указать способы ее измерения или вычисления. Это относится и к определению времени.

В классической *механике* понятие времени рассматривалось иначе, чем оно трактуется *релятивистской механикой,* возникшей с появлением *теории относительности.* Так, И. Ньютон использовал два понятия времени. Об абсолютном времени он говорил: «Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по своей сущности без всякого отношения к чему-либо протекает равномерно...» Таким образом, «абсолютное время», по Ньютону, это нечто нефизическое, данное свыше, существующее само по себе. Он ввел также и понятие «времени относительного, кажущегося и обыденного», под которым подразумевал время, измеряемое приборами.

В современной физике, основанной на релятивистской механике, есть лишь относительное время; для его измерения используют повторяющийся физический процесс. Например, вращение стрелки на ручных часах, колебания маятника, вращение Земли вокруг Солнца, колебания кварцевой пластинки, излучение *света* атомами. Выбирают какой-то физический процесс и объявляют: между двумя его повторениями проходит один и тот же интервал времени. Этот выбранный процесс считают эталоном времени. С его помощью измеряют время.

Но как определить, что выбранный эталон, действительно, надежен? Еще Ньютон писал: «Естественные солнечные сутки, которые мы считаем равными, в действительности, не равны». Каков смысл этих слов? Ведь если оборот Земли вокруг оси выбран за эталон времени, сутки равны по определению. Ответ, и это типично для физики, чисто экспериментальный. Ученые располагают не одним эталоном, а целым набором самых разных по своей физической природе повторяющихся процессов. Выделяют те из них, которые проходят синхронно при сравнении друг с другом, и именно их объявляют эталонами измерения «истинного» времени. Если же при более точных измерениях окажется, что какой-то из эталонов не согласуется с прочими, от него отказываются.

лятор и подобрав нужную частоту вспышек, «останавливают» вентилятор или «заставляют» его медленно вращаться (можно и в обратную сторону).

Очень интересно рассмотреть в свете стробоскопа особенности водяной струи, например тонкой струйки воды из водопроводного крана. Мы увидим, что в конце своего падения она под действием сил поверхностного натяжения разбивается на отдельные капли. А в обычном свете струйка кажется непрерывной, поскольку инерционность зрения создает иллюзию слияния этих капель. Открыв кран полностью, можно наблюдать на поверхности сильной струи образование причудливых выступов и впадин.

Перейдем теперь к экспериментам с волнами на плоской поверхности воды. Небольшие волны, распространяющиеся по ней, — рябь — своим происхождением обязаны поверхностному натяжению. Они носят название капиллярных волн. Для того чтобы возбудить их, можно вставить в водопроводный кран спичку, чуть-чуть приоткрыть его и поставить под частые капли тарелку с водой. Капиллярные волны быстро разбегаются по поверхности, и только с помощью стробоскопа удается хорошо их рассмотреть. Если положить в тарелку различные предметы, то можно видеть, как волны отражаются и огибают их.

Часто для возбуждения поверхностных волн применяют различные вибраторы. Такой вибратор можно сделать из обычного электрического звонка. К молоточку звонка припаивают проволочку с надетой на конец маленькой резиновой пробкой и устанавливают звонок так, чтобы пробка касалась поверхности воды. Подключив звонок к сети (с соблюдением всех правил техники безопасности и, главное, хорошо заизолировав токоведущие части), мы получим расходящиеся волны, структура которых ясно видна при стробоскопическом освещении. Теперь вместо резиновой пробки укрепим на конце проволоки вилку с двумя концами, расстояние между которыми составляет несколько сантиметров. На концы вилки наденем резиновые пробочки. После включения звонка на поверхности возникает интерференционная картина от двух излучателей волн.

Сейчас наиболее точный эталон времени — атомные часы, работа которых основана на измерении частоты световых волн, излучаемых *атомами*.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Вычислительная физика изучает те же объекты и явления, что и другие разделы физики — *атомная физика, геофизика,* физика *плазмы,* механика сплошных сред, *астрофизика.* Но метод, с помощью которого ведутся эти исследования, несколько необычен. Он состоит в моделировании физических явлений с использованием электронных вычислительных машин.

Зачем нужно такое моделирование? Хорошо известно, что существует много физических явлений, экспериментальное изучение которых связано с большими трудностями или даже вообще невозможно на данном этапе развития науки. Как устроена шаровая молния? Что собой представляет знаменитое Красное пятно на Юпитере? Что происходит при столкновении тел, летящих со скоростью, скажем, 1000 км/с? Как лучше защитить первую стенку будущего термоядерного реактора от потока частиц высоких энергий? Из чего состоит ядро кометы? — Список вопросов можно продолжить и дальше. Исчерпывающие ответы на подобные вопросы получить весьма трудно из-за недостатка экспериментальных данных. Конечно, экспериментальные методы непрерывно развиваются. Так, в ближайшие годы намечен ряд запусков космических аппаратов в окрестности приближающейся к Солнцу кометы Галлея. Это будет первая попытка ее экспериментального изучения. И все-таки список «трудных» вопросов растет быстрее, чем возможности физического эксперимента.

Интересно, что для всех физических явлений, которые пока еще недостаточно изучены, характерно, как правило, то, что они управляются хорошо известными физическими законами. И наше непонимание этих явлений происходит только от их чрезвычайной сложности. Здесь на помощь человеку приходят электронные вычислительные машины (ЭВМ), специально созданные для решения наиболее сложных и трудоемких задач.

Как же выполняется моделирование физических явлений на ЭВМ? Сначала разрабатывается физическая модель изучаемого явления, которая должна учитывать всю совокупность знаний об изучаемом объекте или явлении. После того как модель разработана, ее описывают, используя законы физики, той или иной системой уравнений. И наконец, составляют алгоритм решения получившейся математической задачи и программу для ЭВМ. На этом этапе применяются методы вычислительной математики.

Чтобы яснее себе представить все этапы работы, рассмотрим несколько примеров. Пусть нас интересует следующая практическая задача: какие повреждения получит космический аппарат при ударе метеорита, имеющего скорость 100 км/с? В лабораторных условиях разогнать твердое тело до таких скоростей не удается, поэтому экспериментальное изучение этого вопроса пока невозможно. Используем численное моделирование. Построим физическую модель. Из простых оценок видно, что при скоростях удара порядка 100 км/с прочностные свойства материала не играют никакой роли. Поэтому стенку аппарата и налетающую частицу можно считать сжимаемыми жидкостями и описывать движение, вызванное ударом, системой уравнений гидродинамики (см. *Гидроаэромеханика*). Можно показать далее, что перенос энергии *теплопроводностью* и излучением не имеет в рассматриваемых условиях большого значения и этими процессами можно пренебречь. Для решения уравнений гидродинамики разработаны эффективные численные методы. Выбор конкретного метода решения зависит от особенностей задачи. Решая уравнения гидродинамики, можно получить картину пробивания стенки быстрой частицей или образования кратера — если масса частицы мала.

В физике *плазмы* широкое распространение получил метод частиц в ячейках. Идея его состоит в том, что плазму рассматривают как набор большого числа (до нескольких миллионов) заряженных частиц, движущихся во внешних и создаваемых ими самими электрических и магнитных полях. При таком способе моделирования удается выяснить важные свойства плазменной *турбулентности,* неустойчивости плазмы во внешних полях, эволюции плазменных конфигураций. С помощью данного метода решены многие задачи гидродинамической неустойчивости, обтекания тел, взаимодействия волн.

Еще один круг проблем, решаемых вычислительной физикой, связан с квантовомеханическими расчетами свойств *атомов, молекул* и *твердых тел* (см. *Квантовая механика*).

Иногда методы вычислительной физики успешно применяют и для решения задач, допускающих прямое экспериментальное исследование. Это бывает в тех случаях, когда эксперимент оказывается слишком дорогостоящим или требует для своего проведения продолжительного времени. Вычислительная физика помогает и тогда, когда из большого числа вариантов надо выбрать оптимальный.

Надежность результатов численных экспериментов зависит от использования наиболее

совершенных моделей и алгоритмов, от возможностей ЭВМ. Особую важность приобрело численное моделирование явлений, происходящих в течение очень короткого времени и в очень малых пространственных областях. Например, оно помогает успешно решать проблемы инерционного *термоядерного синтеза.*

ВЯЗКОСТЬ

Вязкость (ее иногда еще называют в н у т р е н н и м т р е н и е м) — свойство текучих тел (*жидкостей* и *газов*) сопротивляться перемещению одной их части относительно другой под действием внешних сил.

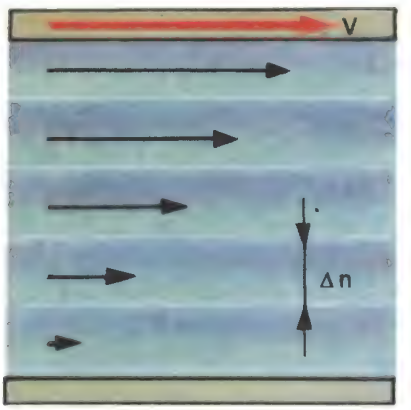
Количественно вязкость определяется величиной касательной силы, которая должна быть приложена к единице площади сдвигаемого слоя, чтобы поддерживать в этом слое л а м и н а р н о е т е ч е н и е (см. *Турбулентность*) с постоянной скоростью относительного сдвига, равной единице.

Вязкость газов и жидкостей, согласно молекулярно-кинетической теории, вызвана передачей *импульса* от молекул более быстро движущегося слоя к молекулам более медленного слоя, которая происходит при перемешивании молекул соседних слоев вследствие теплового движения.

Природа возникновения внутреннего трения может быть объяснена следующим образом. Пусть между двумя плоскостями находится слой жидкости (или газа); верхняя плоскость движется относительно нижней со скоростью v (см. рис.). Мысленно разобьем жидкость на очень тонкие слои параллельными плоскостями, отстоящими на Δn друг от друга. Слои жидкости, касающиеся твердых тел, прилипают к ним. Промежуточные слои имеют такое распределение скоростей, как изображено на рисунке. Величина $\frac{\Delta v}{\Delta n}$ показывает, насколько быстро меняется модуль скорости при перемещении на единицу длины в направлении, перпендикулярном вектору скорости и, следовательно, слоям жидкости. Между соприкасающимися слоями при различии в скоростях возникают силы, направленные вдоль плоскости соприкосновения и препятствующие их относительному перемещению,— силы внутреннего трения.

В простейшем случае вязкость определяется по формуле, предложенной еще И. Ньютоном. По этой формуле касательное напряжение сил внутреннего трения τ пропорционально изменению скорости: $\tau = \eta \frac{\Delta v}{\Delta n}$, где η — величина, названная вязкостью жидкости (или газа).

Этот рисунок помогает наглядно представить возникновение внутреннего трения.



Единица вязкости в СИ — 1 Па·с.

Силы внутреннего трения гораздо меньше сил т р е н и я с к о л ь ж е н и я. Поэтому для уменьшения трения между движущимися частями машин и механизмов используется смазка — слой вязкой жидкости, заполняющий пространство между трущимися поверхностями и оттесняющий их друг от друга. Это приводит к существенному уменьшению нагрева и износа деталей. Вместе с тем следует избегать попадания жидкости между фрикционными муфтами, ремнем и шкивом в ременной передаче, ведущими колесами локомотива и рельсом и т. п., ибо во всех этих случаях именно сила трения служит для передачи движения.

С увеличением *температуры* вязкость газов возрастает, а жидкостей (за некоторым исключением) резко падает. Это связано с различиями в характере движения молекул в жидкости и газе. При понижении температуры вязкость некоторых жидкостей настолько возрастает, что они теряют характерную для них способность течь, превращаясь в аморфные твердые тела (см. *Аморфное состояние*).

Величина, обратная вязкости, называется т е к у ч е с т ь ю: $\varphi = \frac{1}{\eta}$. Она определяет скорость течения данного слоя под влиянием внешних сил.

Г

ГАЗЫ

Газы — это одно из состояний вещества, в котором его частицы движутся свободно, равномерно заполняя доступное для них пространство. Они оказывают *давление* на ограничивающую это пространство оболочку. Плотность газов при нормальном давлении на несколько порядков меньше плотности *жидкостей*.

Свойства большинства газов — прозрачность, бесцветность и легкость — затрудняют их изучение; поэтому физика и химия газов родились поздно и развивались довольно медленно. Только в XVII в. было доказано, что воздух обладает весом (Э. Торричелли и Б. Паскаль); тогда же нидерландский химик Я. Ван-Гельмонт ввел термин *газы* (по-видимому, от греческого слова «хаос») для обозначения воздухоподобных веществ.

К середине XIX в. были установлены основные опытные закономерности, которым подчиняются газы. К ним относятся:

1) закон Бойля — Мариотта: для данной массы газа при постоянной температуре t объем его V обратно пропорционален давлению: $p : pV = \text{const}$.

2) законы Гей-Люссака: давление данной массы газа при постоянном объеме меняется линейно с температурой: $p_t = p_0(1 + \alpha_p t)$; объем данной массы газа при постоянном давлении меняется линейно с температурой: $V_t = V_0(1 + \alpha_V t)$.

Первый из этих законов был экспериментально установлен французским физиком Ж. Шарлем в 1787 г. и иногда называется законом Шарля.

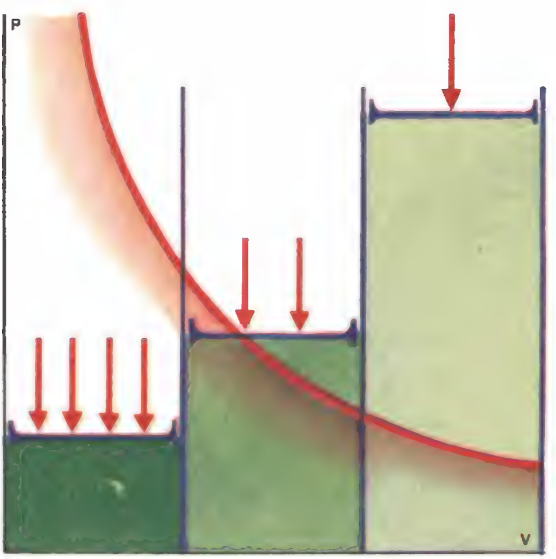
Коэффициент α_p называется термическим коэффициентом давления, α_V — термическим коэффициентом объемного расширения. Для всех газов приближенно $\alpha_p \approx \alpha_V \approx \frac{1}{273}$ град$^{-1}$. Поэтому закон Гей-Люссака (например, для объема) можно записать в форме: $V = V_0 \frac{t+273}{273}$, или, вводя абсолютную температуру $T = t + 273$, выраженную в кельвинах: $V = V_0 \frac{T}{273}$

По *закону Авогадро*, при $T = 273$ К, или 0° С, и $p = 1$ ат 1 *моль* любого газа занимает объем $V = 22{,}41$ л. Число молекул в таком объеме равно *числу Авогадро* $N = 6{,}02 \cdot 10^{23}$.

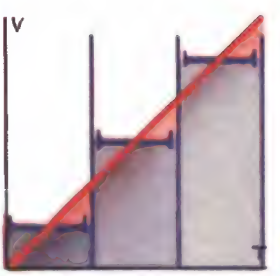
Газы, строго подчиняющиеся законам Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, называются идеальными. Практически все газы ведут себя как идеальные при не слишком высоких давлениях и не слишком низких температурах.

3) Для 1 моля идеального газа правая часть уравнения Бойля — Мариотта равна RT, если температура выражена в кельвинах. Уравнение $pV = RT$ называют уравнением состояния идеального газа; оно было получено в 1834 г. французским физиком и инженером Б. Клапейроном и обобщено в 1874 г. Д. И. Менделеевым для любой массы газа. Входящая в это уравнение постоянная R называется газовой постоянной; она равна 8,31 Дж/моль·град.

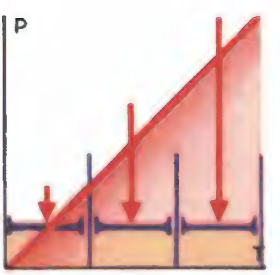
Закон Клапейрона — Менделеева также справедлив только для идеальных газов. Для них выполняется еще один закон — закон Дальтона: давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь, т. е. тех давлений, которые производил бы каждый газ в отдельности, если бы он был взят при той же температуре в объеме смеси.



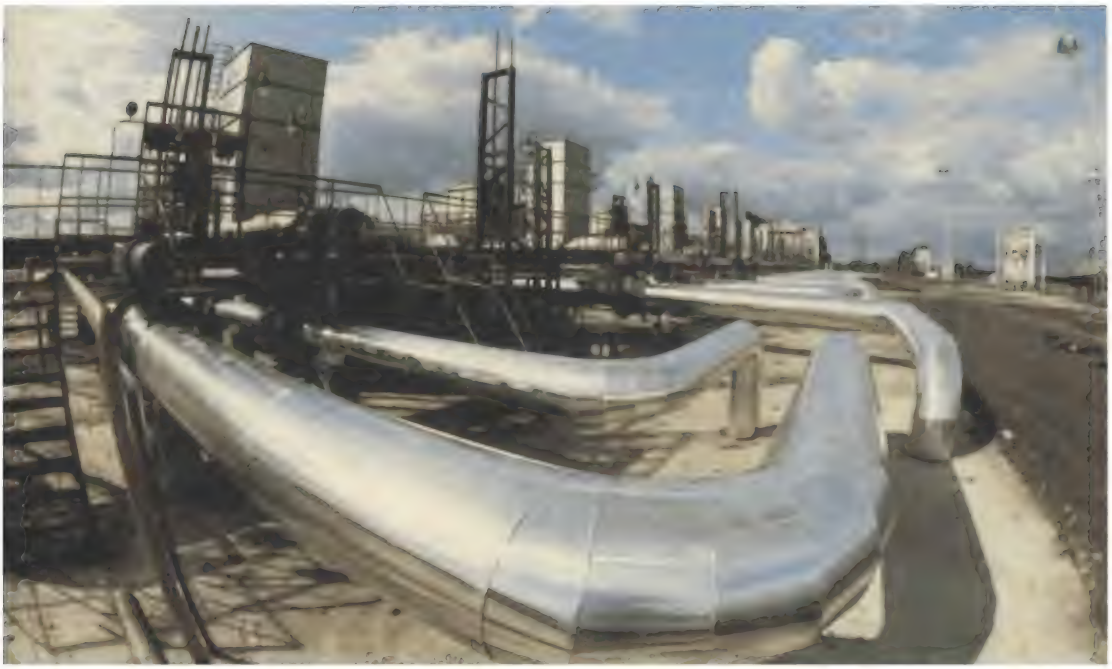
Чем больше приложенное к газу давление, тем меньший объем он занимает; произведение объема газа на давление — величина постоянная: $pV = \text{const}$.



Объем данной массы газа при постоянном давлении и давление данной массы газа при постоянном объеме линейно растут с температурой.



Современные магистральные газопроводы тоже работают согласно газовым законам.



Кинетическая теория газов основана на предположении, что молекулы в газах находятся на расстояниях, значительно превышающих их размер. Тепловое движение молекул газов является равномерным и прямолинейным на длине свободного пробега, в несколько раз превышающей расстояние между молекулами (и тем более размеры самих молекул). При столкновении с другой молекулой или со стенкой сосуда молекула меняет направление и скорость, как при столкновении бильярдных шаров, т. е. по законам удара упругих тел. Взаимодействия между молекулами идеального газа (кроме редких столкновений) отсутствуют; его энергия зависит только от температуры.

Кинетическая теория позволила очень хорошо объяснить явления *вязкости, диффузии* и *теплопроводности* газов.

Реальные газы в зависимости от температуры, давления и физической природы газа в большей или меньшей степени отклоняются от законов идеальных газов. При больших давлениях необходимо вводить, по крайней мере, две поправки: на силы притяжения между молекулами и на объем самих молекул. Было предложено несколько десятков уравнений состояния реальных газов. Простейшее из них — уравнение Ван-дер-Ваальса $(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$, в котором a и b — постоянные величины, зависящие от природы газа и характеризующие поправки на взаимодействие (a) и собственный объем (b) молекул.

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

Атомное ядро подчиняется тем же законам *квантовой механики*, что и *атом*. Энергия атома принимает не любые значения, а вполне определенный ряд величин, которые называются энергетическими уровнями. Такие уровни существуют и в ядре. Нижний из них носит название основного, а уровни с большей энергией — возбужденных. В атоме различие между уровнями связано с различными состояниями электронных оболочек, в ядре — с состояниями ядерных частиц — *протонов* и *нейтронов*.

Переходя из возбужденного состояния в основное, атом излучает порции — кванты видимого света, ультрафиолетового или рентгеновского излучения. Ядро при аналогичных переходах излучает гамма-кванты. Это — очень коротковолновое, с длиной волны $\lambda = 10^{-10}—10^{-13}$ м, электромагнитное излучение. Соответственно, энергия гамма-квантов $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ лежит в пределах от десятков КэВ до нескольких МэВ (напомним, что ν — частота, λ — длина волны излучения, c — скорость света, h — постоянная Планка).

Тот факт, что энергия ядерного излучения в тысячи и даже миллионы раз больше атомного, связан с огромной величиной сил, действующих в ядре между частицами.

Причины, по которым ядро может оказаться

в возбужденном состоянии, самые разные. Это происходит после *бета-* или *альфа-распада*, при *ядерных реакциях* и т. п. Время перехода из возбужденного состояния в основное (если при этом не требуется сильная перестройка ядра) очень мало, оно составляет 10^{-10} — 10^{-13} с.

Проходя через вещество, гамма-излучение поглощается за счет *фотоэффекта, Комптона эффекта* и образования электрон-позитронных пар (см. *Антивещество*).

Пробеги гамма-квантов с энергией 1 МэВ достаточно велики и составляют десятки сантиметров в легких веществах.

Гамма-кванты излучаются во многих процессах, в которых участвуют *элементарные частицы*. Например, при распадах частиц:

$$\pi^0 \to 2\gamma\,(E_{2\gamma} = 135\ \text{МэВ}),$$
$$\eta_{549} \to 2\gamma\,(E_{2\gamma} = 549\ \text{МэВ}) —$$

или при аннигиляции частицы и античастицы (позитрона и *электрона*):

$$e^+ + e^- = 2\gamma\,(E_{2\gamma} = 1{,}02\ \text{МэВ}).$$

Гамма-излучение широко используется в различных областях человеческой деятельности. Так, в медицине для лечения злокачественных опухолей применяют кобальтовые пушки (энергия γ-лучей ~ 1,3 МэВ), а для диагностики заболеваний используют радиоактивный иод (E_γ~0,3 МэВ) и десятки других гамма-активных препаратов. Гамма-излучение естественного радиоактивного изотопа калия-40, содержащегося в природном калии, служит для определения *радиоактивности* человеческого тела.

ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР

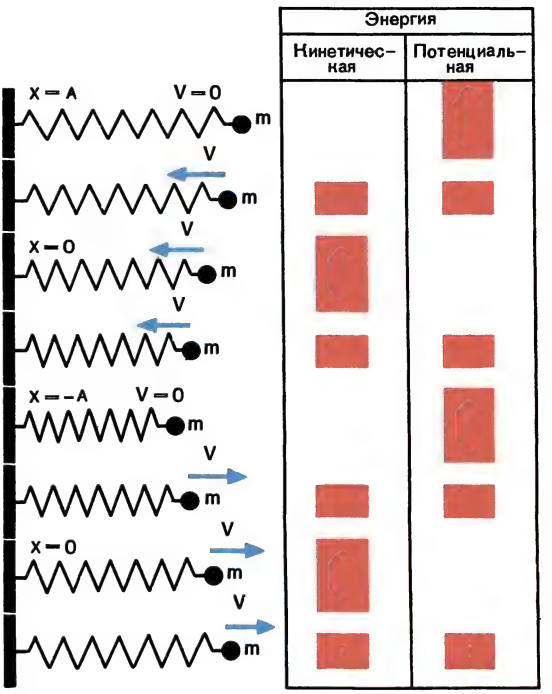
Наверное, каждому когда-нибудь приходилось наблюдать за теми или иными колебаниями — за движением маятника часов, качелей и т. п.

В процессе такого наблюдения можно заметить, что все эти колебания обладают замечательным свойством постоянства своего периода.

Это свойство — общее для широкого класса колебаний — первым установил Г. Галилей в 1593 г. Изохронность, или, иначе говоря, закон постоянства периода колебаний маятника, позволил впоследствии нидерландскому ученому XVII в. Х. Гюйгенсу применить маятник в часах.

Необходимое условие возникновения колебаний в любой системе — наличие возвращающей силы, которая всегда стремится вернуть систему в положение равновесия после ее

Переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно в процессе колебания грузика на пружине.



выведения из этого положения внешним воздействием.

Рассмотрим процесс колебания на примере простейшего колебательного движения материальной точки массой m, связанной с закрепленной пружиной жесткости k. При отклонении материальной точки на расстояние x от положения равновесия на нее начинает действовать со стороны пружины возвращающая сила $F = -kx$, которая стремится вернуть ее обратно. Согласно второму закону Ньютона, ускорение материальной точки пропорционально приложенной силе и обратно пропорционально величине ее *массы*:

$$a(t) = -\frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x(t).$$

Это уравнение можно переписать в виде: $x''(t) + \omega_0^2 x(t) = 0$, где через ω_0^2 обозначено отношение $\frac{k}{m}$, а $x''(t)$ — вторая производная по времени от смещения $x(t)$. Непосредственной подстановкой легко проверить, что решением последнего уравнения является функция $x(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Из найденного решения видно, что связанная с пружиной материальная точка, отведенная от положения равновесия на расстояние A и предоставленная затем самой себе, будет совершать гармонические колебания около своего положения равновесия. Период этих колебаний определяется циклической частотой ω_0; $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ и не зависит от амплитуды

колебания A, которая определяет его размах.

В выражении для зависимости $x(t)$ присутствует величина φ_0, которая называется начальной фазой колебания. Как видно из приведенного выше закона гармонического колебания, начальную фазу всегда можно обратить в нуль удачным выбором начала отсчета времени.

Рассмотрим теперь это же гармоническое колебание с точки зрения *закона сохранения энергии*. При максимальном удалении от положения равновесия (см. рис.) скорость материальной точки равна нулю, и вся энергия системы сосредоточена в потенциальной энергии растянутой пружины. По мере приближения к положению равновесия натяжение пружины уменьшается, а скорость грузика увеличивается, и потенциальная энергия растянутой пружины постепенно переходит в кинетическую энергию движения материальной точки. При прохождении положения равновесия кинетическая энергия достигает своего максимального значения, а затем, по мере удаления грузика от положения равновесия в другую сторону, начинается обратный процесс — движение грузика замедляется, натяжение пружины увеличивается и, дойдя до крайней точки движения, материальная точка «замирает»: вся приобретенная на первом этапе движения кинетическая энергия снова перешла в потенциальную энергию пружины. После этого описанный процесс повторяется при движении грузика в обратном направлении. Таким образом, мы видим, что при гармоническом движении происходит периодический переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

При максимальном отклонении грузика от положения равновесия вся энергия системы сосредоточена в потенциальной, и поэтому полная энергия колеблющейся системы может быть выражена через амплитуду колебаний и частоту:

$$E = \frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}$$

Оказывается, этим свойством обладают любые системы, колебание в которых происходит по гармоническому закону: энергия гармонического колебания (или *волны*) пропорциональна квадрату амплитуды этого колебания.

Единственным условием возникновения гармонических колебаний в рассмотренной системе оказалась линейная зависимость возвращающей силы от смещения. Такое условие выполняется при колебаниях многих (и не только механических) систем: это и малые колебания тела на длинной нерастяжимой нити в поле тяжести Земли (математический маятник), и колебания молекул, и электрические колебания в LC-контуре. Каждая из этих систем, обладающая свойством линейного возрастания возвращающей силы по мере удаления системы от положения равновесия, носит название линейного осциллятора (слово «осциллятор» происходит от латинского глагола, означающего «качаться»).

ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Генераторы электромагнитных колебаний применяются всюду. Ламповые генераторы установлены на радио- и телевизионных станциях; магнетронный генератор — главный узел современного радиолокатора; с помощью *мазеров* и *лазеров* ученые изучают строение вещества, точно измеряют расстояния, скорости тел, ориентируют в пространстве космические корабли.

Созданный впервые в 1913 г. ламповый

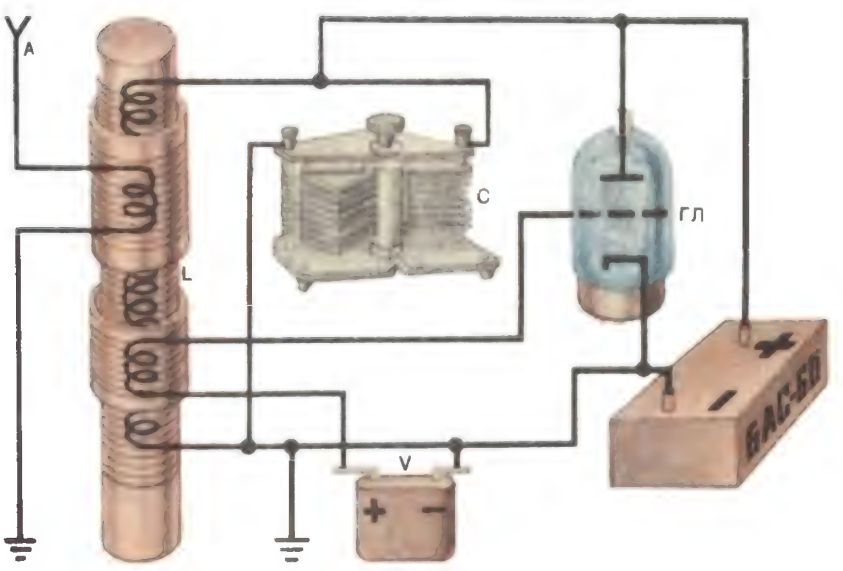


Рис. 1. Схема радиопередатчика. *А* — антенна; *ГЛ* — генераторная лампа; *L*, *C* — индуктивность и емкость.

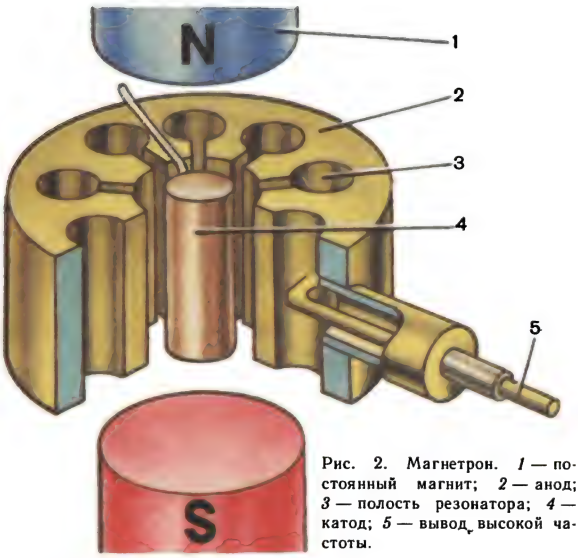


Рис. 2. Магнетрон. *1* — постоянный магнит; *2* — анод; *3* — полость резонатора; *4* — катод; *5* — вывод высокой частоты.

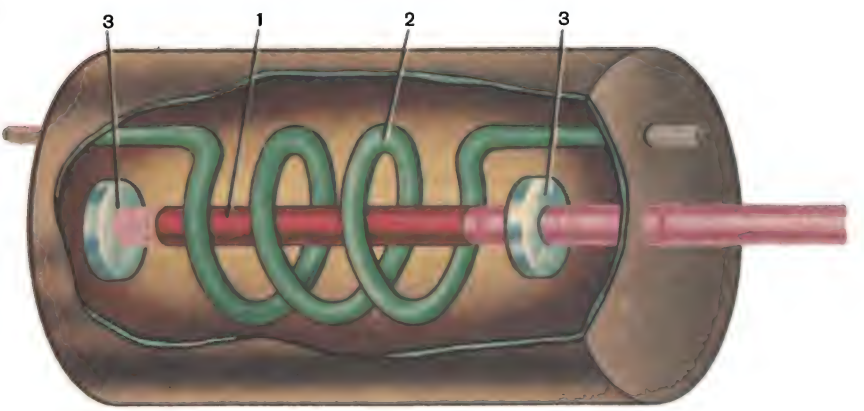
генератор остается наиболее распространенным генератором электромагнитных когерентных волн и в наши дни. В таком генераторе в анодную цепь трехэлектродной лампы — триода включают последовательно с источником питания резонансный контур, в состав которого входят соединенные параллельно индуктивность L и емкость C (рис. 1). Основная катушка L связана индуктивно с сеточной L_c. Когда в контуре возникают колебания, переменное магнитное поле наводит ЭДС (электродвижущую силу) на катушку L_c, и с нее напряжение попадает на сетку, на которой появляется переменный потенциал, управляющий силой тока анодной цепи. Поэтому режим колебаний устанавливается такой, что потери энергии на излучение радиоволн и нагрев элементов схемы компенсируются энергией источника питания, преобразуемой в колебания в анодной цепи. В пространство волны излучаются антенной, которая связана с основным контуром с помощью индуктивной катушки.

Длина волны ламповых радиопередатчиков заключается в интервале от 10 до нескольких тысяч метров, так как более длинные волны слабо излучаются в пространство. Генерация коротких волн — метрового и сантиметрового диапазона — генераторами с обычными радиолампами невозможна: начинает сказываться большое расстояние между электродами этих ламп, из-за чего время пролета *электрона* от катода до сетки становится больше периода колебаний. В этом случае электрон, покинувший катод в момент, когда сетка была заряжена положительно, перестанет испытывать ее притяжение, еще не долетев до нее. Специальные лампы с очень малыми расстояниями между электродами —«желуди», маячковые лампы — обеспечивают генерацию радиоволн с длиной волны до 10 см.

Коренным решением проблемы было создание магнетронного генератора, в котором используется «лампа» принципиально нового типа — магнетрон (рис. 2). Здесь магнитное поле принуждает электроны двигаться по круговым орбитам, проходящим у поверхности анода, окружающего цилиндрический катод. Роль резонансного контура играют цилиндрические анодные камеры — резонаторы, связанные щелями с пространством, в котором движутся электроны. Двигаясь вблизи щелей в электрическом поле возбуждаемых колебаний, электроны тормозятся и отдают свою энергию полю в резонаторе. При этом магнитное поле и напряжение анода подбирают так, чтобы колебания были незатухающими. Магнетронные генераторы могут быть созданы для генерации радиоволн не короче 0,5 см. Без них не обходится ни один радиолокатор.

Существуют и другие типы генераторов ультракоротких радиоволн, например генератор на клистроне; колебания в его резонаторах поддерживаются потоком электронов, которые движутся прямолинейно, а не по круговым орбитам, как в магнетронном генераторе. Применяются лампы бегущей и обратной волны. Принципиально новые типы генераторов электромагнитных волн — молекулярные квантовые генераторы — *мазеры* и оптические генераторы — *лазеры* — перекрывают диапазон длин волн электромагнитного излучения от 1 см до долей микрометра (рис. 3).

Рис. 3. Лазер. *1* — излучающее тело; *2* — лампы накачки; *3* — зеркало резонатора.



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Законы геометрической *оптики* выполняются тогда, когда длина волны света от источника много меньше характерных размеров окружающих предметов. В этом случае можно использовать такое приближенное понятие, как луч света. Луч формируется, например, с помощью диафрагм, как это показано на рис. 1. Примером слабо расходящегося светового луча может служить луч *лазера*.

Еще в середине XVII столетия французский ученый П. Ферма́ сформулировал основной принцип геометрической оптики:

луч света, проходящий через две точки, идет между ними по такому пути, который требует наименьшего времени.

Из принципа Ферма следует:

1. В однородной среде свет распространяется по прямым линиям.

2. Существует принцип обратимости луча (можно поменять местами источник и приемник света, но путь распространения света не изменится).

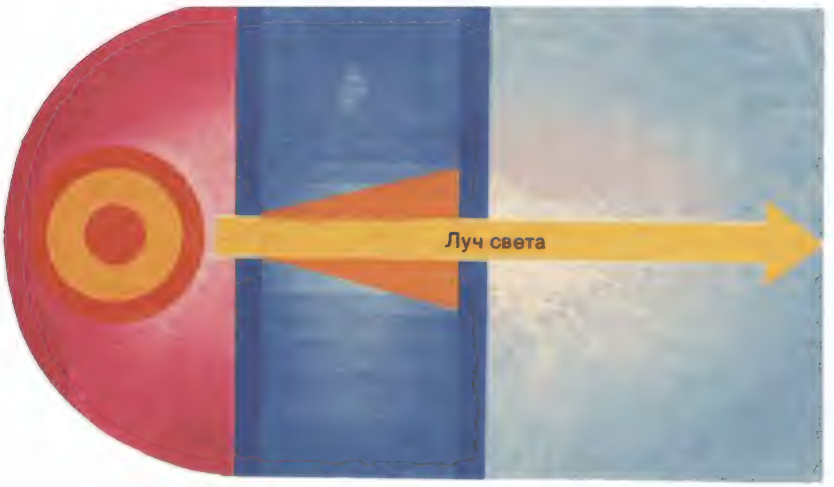


Рис. 1. Формирование светового луча с помощью диафрагмы.

КАМЕРА-ОБСКУРА

Такая камера была известна еще итальянскому ученому и художнику эпохи Возрождения Леонардо да Винчи. Принцип ее устройства очень прост: лучи света, отраженные от объекта, проходят сквозь малое отверстие в закрытом ящике и падают на противоположную стенку — экран. На экране получают перевернутое уменьшенное изображение (см. рис.).

Сделать камеру тоже несложно. В деревянном или картонном ящике выпиливают одну стенку и укрепляют внутри матовое стекло или полупрозрачную бумагу (кальку). Напротив экрана проделывают малое отверстие. Теперь если поставить в нескольких метрах перед отверстием лампу с абажуром (яркий объект), то на матовом стекле вы увидите ее перевернутое изображение. С уменьшением размера отверстия будет увеличиваться резкость изображения и одновременно падать его яркость. Существует еще одна причина, по которой отверстие нельзя сделать очень малым, — этому помешает явление *дифракции* света. Оптимальный диаметр отверстия при расстоянии от него до стекла 10 см составляет 0,5 мм. Но можно взять и 1 мм, т. е. проткнуть стенку ящика обычной иглой.

Камера-обскура позволяет нарисовать освещенный объект в уменьшенном масштабе. Собственно, для этого она и использовалась первоначально. Но затем, после изобретения фотоматериалов, камера стала первым фотографическим аппаратом.

Если в темноте поместить вместо стекла фотопластинку, плотно закрыть или занавесить заднюю стенку ящика и осветить объект, можно получить достаточно резкий негатив. Важно только, чтобы камера не имела щелей. Выдержка будет очень долгой — десятки секунд, минуты, так что такой камерой можно фотографировать только неподвижные объекты.

Основные законы оптики могут быть доказаны с помощью принципа Ферма.

Закон отражения света: падающий луч, перпендикуляр к отражающей поверхности и отраженный луч лежат в одной плоскости, причем угол падения α равен углу отражения β (рис. 2).

Для вывода этого закона построим точку B^1, симметричную точке B относительно отражающей поверхности. Расстояние $AOB = AOB^1$, а любое другое $AO^1B^1 > AOB^1$. Отсюда видно, что наименьшее время свет затратит, двигаясь по пути AOB. Легко доказать, что при этом $\angle\alpha = \angle\beta$.

Закон преломления света: луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром к границе раздела сред (рис. 3). Угол падения α и угол преломления β связаны соотношением:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n,$$

где n — относительный показатель преломления, постоянная, равная отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде: $n = c_1/c_2$. Этот закон может быть выведен также на основании принципа Ферма: свет стремится пройти больший путь в веществе, в котором имеет бóльшую скорость.

И еще один пример применения принципа Ферма. В стекле скорость света меньше, чем

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Для опыта нужен стеклянный аквариум или ящик из оргстекла и малорасходящийся пучок света. (Проще всего использовать диапроектор и диафрагмы.) Налейте до половины высоты аквариум водой, слегка подкрашенной чернилами, тушью или акварельной краской. Конечно, еще лучше воспользоваться какой-либо из флюоресцирующих красок (см. *Люминесценция*). Узкий пучок света направьте так, чтобы он проходил вблизи поверхности воды под небольшим углом к горизонтали (первый рисунок). Если смотреть на аквариум сбоку, то будет виден светящийся след пучка — отрезок прямой линии.

Теперь приготовьте концентрированный раствор поваренной соли, профильтруйте его, чтобы он был прозрачным, и добавьте в раствор того же красящего вещества, что и в воду. С помощью воронки, на конце которой укреплена резиновая трубка, опущенная на дно аквариума, медленно, не взбалтывая воду, доливайте в аквариум раствор соли.

В тот момент, когда аквариум почти наполнится и граница вода — раствор станет чуть выше точки вхождения луча, луч начнет изгибаться так, как это показано на помещенном здесь втором рисунке.

Объяснение этого явления основывается на законе преломления света. Вода и солевой раствор имеют различные показатели преломления. У последнего он больше. В этом случае на границе жидкостей возможно явление полного внутреннего отражения. Но поскольку граница размыта из-за существующего всегда перемешивания растворов, луч отражается не под углом, а по дуге. Меняя угол падения луча на границу, вы можете определить угол полного внутреннего отражения и коэффициент преломления солевого раствора.

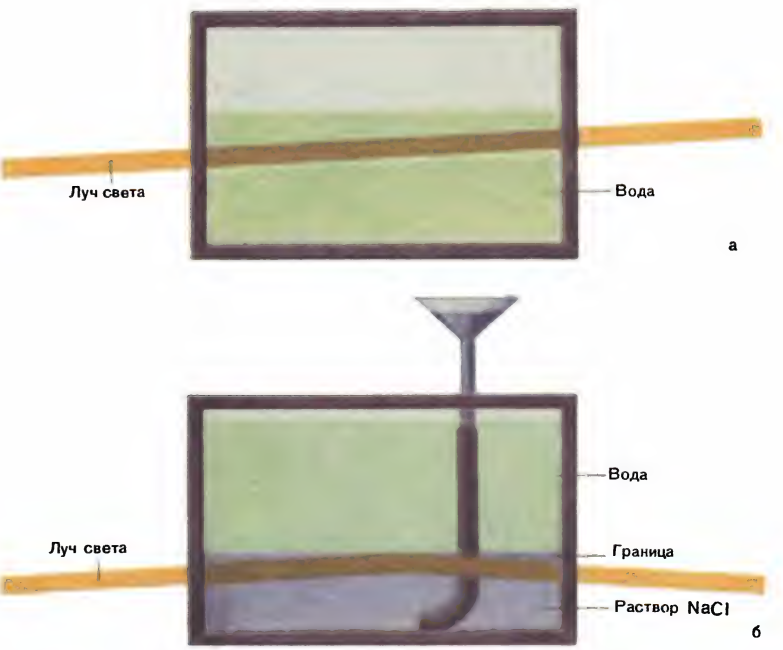


Рис. 2. По закону отражения света угол падения α равен углу отражения β.

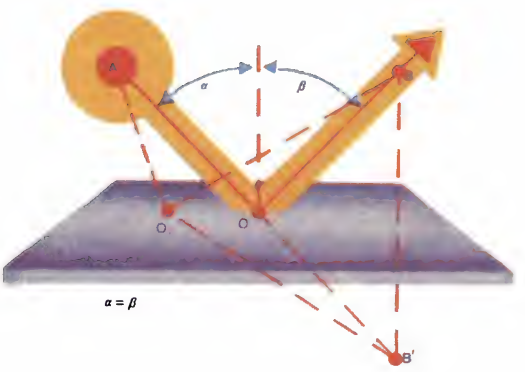


Рис. 3. Этот рисунок иллюстрирует закон преломления света.

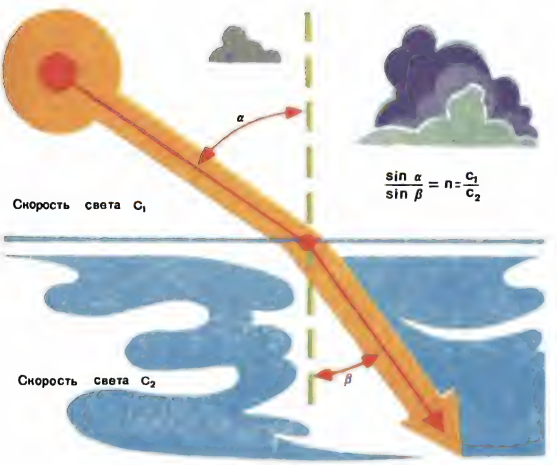
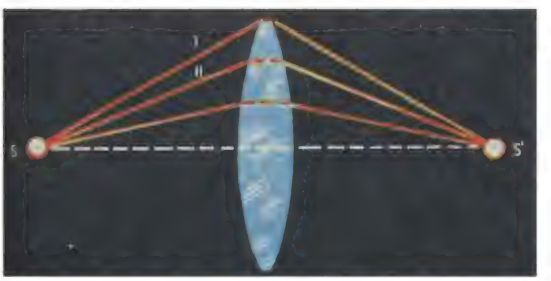


Рис 4. Пути I и II, которые световой луч проходит в воздухе и линзе, одинаковы по времени



в воздухе. Поэтому пути I и II, которые луч света проходит в воздухе и собирающей линзе из стекла (рис. 4), одинаковы по времени. На пересечении лучей возникает изображение источника света. Геометрическая оптика позволила создать относительно простую теорию многих *оптических приборов* — лупы, телескопа, микроскопа и др.

ГЕОФИЗИКА

Геофизика, или физика Земли, — это комплекс наук, изучающих нашу планету и ее ближайшее окружение — Солнечную систему. Земля и другие небесные тела образовались около 4,6 млрд. лет назад. Именно таков возраст древнейших пород Земли, Луны и метеоритов. (Возраст породы отсчитывается с момента ее последнего плавления или конденсации из пыли, а определяется по относительному содержанию некоторых *изотопов*.)

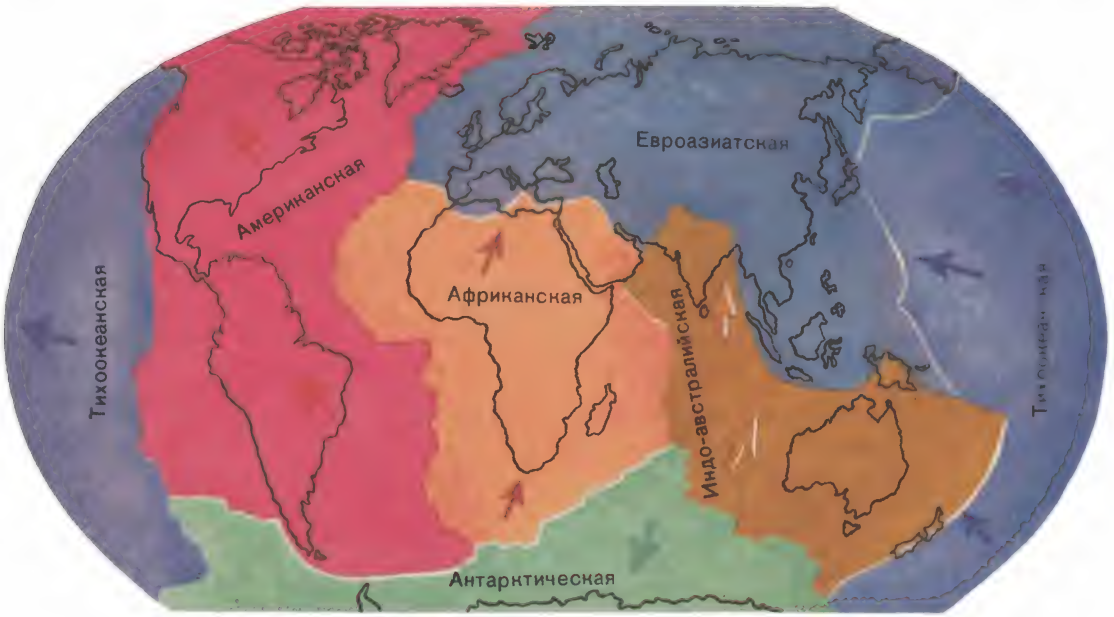
Планеты рождались при столкновении малых небесных тел. Многочисленные следы падений крупных метеоритов — эти свидетельства древнейших событий — можно даже без бинокля видеть на поверхности Луны. При этом темные места Луны иногда имеют округлые очертания — видны полустертые последующими столкновениями остатки огромных кратеров с возрастом 3 — 4 млрд. лет. А на Земле таких следов не осталось, и вот почему: наша планета жидкая!

Это утверждение звучит парадоксально, поскольку течения вещества Земли почти не заметны для нас. Они, однако, существуют, их скорость составляет несколько сантиметров в год. Легко высчитать, сколько времени потребуется для перемещения с такой скоростью на расстояние, равное диаметру земного шара. За это время, т. е. за 0,5 млрд. лет, земная поверхность меняется очень существенно, поэтому на Земле трудно найти древнейшие породы.

По-настоящему твердой является только тонкая (всего 20 — 40 км) оболочка — к о р а З е м л и. О внутреннем строении нашей планеты известно главным образом по данным с е й с м о л о г и и — науки, изучающей распространение *звука* в земном шаре. С глубиной температура земных недр возрастает. Под действием высоких температур породы размягчаются, и вещество на глубинах от 40 до 400 км способно течь под действием долговременных нагрузок. Например, всего лишь около 10 тыс. лет назад при потеплении климата растаяли колоссальные ледники, покрывавшие Северную Европу и Канаду так же, как сейчас ими покрыты Антарктида и Гренландия. Когда земная кора освободилась от нагрузки двухкилометрового слоя льда, она начала подниматься. Этот подъем со скоростью в несколько миллиметров в год продолжается в Скандинавии и на севере Америки и сейчас, а обеспечивается он вязким течением верхней мантии.

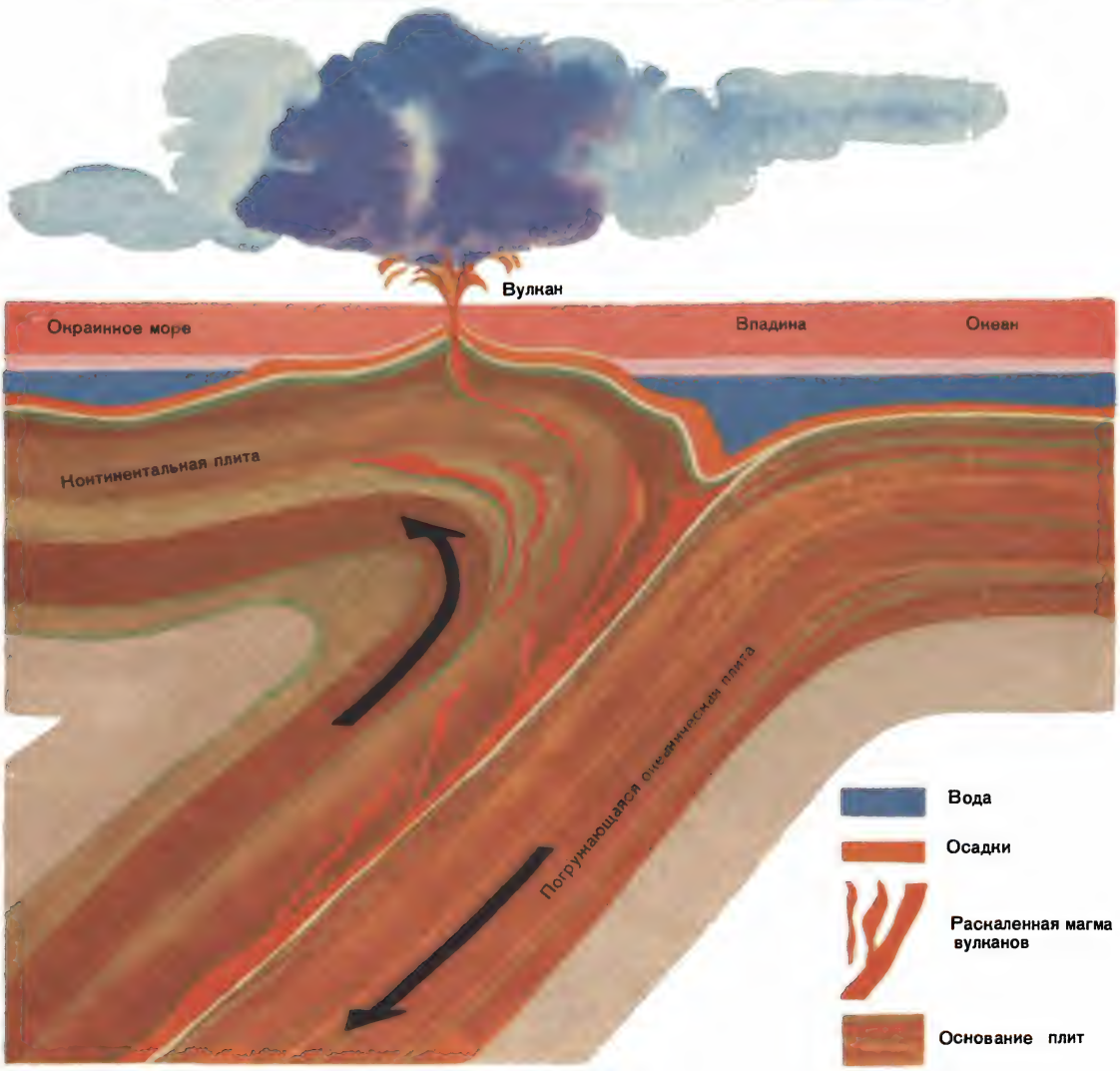
М а н т и е й называют весь слой глубиной от 40 до 2920 км, где температура недр повышается примерно до 4,5 тыс. градусов. В слое мантии плотность пород скачком увеличивается с 5,5 до 10 г/см^3, а ниже его вещество

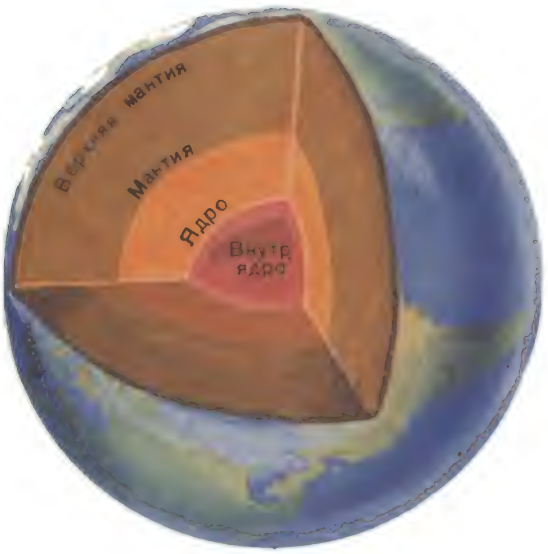
Основные плиты литосферы Земли и направления их движений.



Внизу: Погружение океанической плиты под континентальную и образование вулкана.

Внутреннее строение Земли.





Земли находится в расплавленном состоянии. Это так называемое жидкое ядро Земли радиусом 3450 км является жидким уже и в обычном смысле — оно течет даже под действием кратковременных нагрузок, возникающих в звуковых волнах. Регулярные течения этой жидкости с высокой электропроводностью, по-видимому, и приводят к появлению магнитного поля Земли (см. *Магнитосфера*). Наконец, в самом центре Земли есть еще внутреннее твердое ядро радиусом 1250 км, состоящее из вещества с плотностью около 13 г/см^3.

Кора Земли, называемая еще литосферой, т. е. каменной оболочкой, состоит из отдельных плит, медленно перемещающихся друг относительно друга. Главные литосферные плиты и их современные движения показаны на рис. Новая земная кора образуется в районах срединно-океанических хребтов, а старая кора, покрытая трехкилометровым слоем осадков, исчезает, «ныряя» под континенты. Взаимные перемещения плит, рождение и разрушение твердой коры Земли сопровождаются землетрясениями. Когда погружающаяся литосферная плита попадает в зону высоких температур, происходят химические реакции, преобразующие ее осадочный слой. При этом образуются газы и водяные пары, которые вулканами извергаются в атмосферу, и возможно, что органическое вещество осадков частично переходит в нефть.

Именно вулканическая деятельность и привела к появлению первичной атмосферы Земли, а вода, образовавшаяся при дифференциации вещества мантии, составила Мировой океан.

Кроме перечисленных направлений исследований геофизика изучает непостоянное во времени вращение Земли, ее истинную форму, взаимодействие Земли и Луны (приливы, замедление вращения), климат Земли и др.

ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА

Гидроаэромеханика — раздел *механики*, изучающий движение жидких и газообразных сред и их взаимодействие между собой и с граничащими с ними *твердыми телами*.

В отличие от раздела физики — молекулярно-кинетической теории *жидкостей* и *газов* (см. *Кинетическая теория*) гидроаэромеханика заменяет действительную молекулярную структуру жидкостей и газов идеализированными представлениями о материальной среде, обладающей двумя основными свойствами — сплошностью (непрерывностью) и легкой подвижностью (текучестью). При этом жидкости считают практически несжимаемыми.

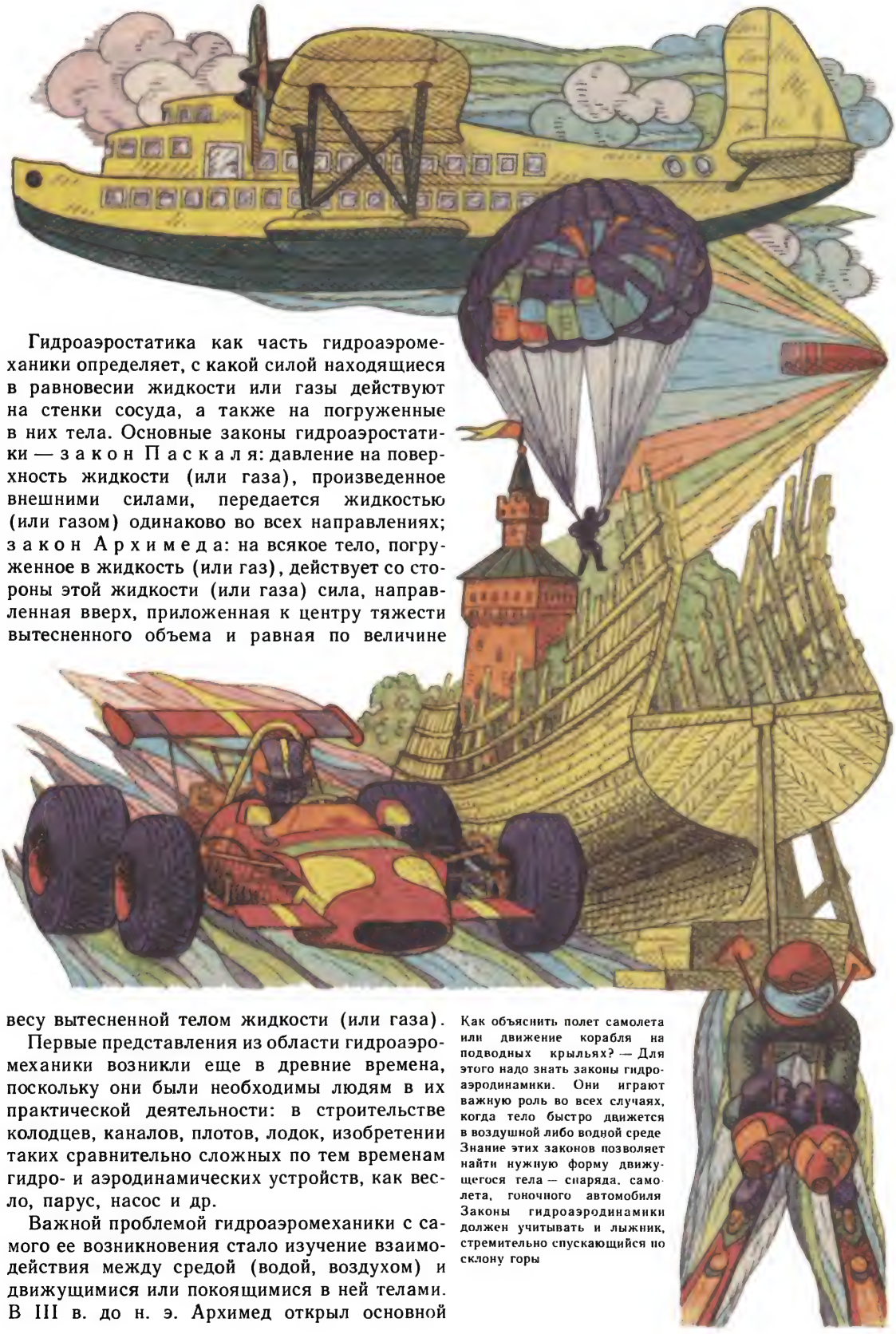
Гидроаэромеханика включает два основных раздела. Аэромеханика изучает законы движения воздушной (а, вернее, газообразной) среды и ее взаимодействия с движущимися в ней твердыми телами, главным образом близкими по форме к используемым в авиации (крыло, удлиненное тело вращения и т. п.). Гидромеханика — давление и движение несжимаемых жидкостей и взаимодействие их с твердыми телами.

Гидроаэромеханика разделяется на теоретическую и экспериментальную.

При теоретическом исследовании движения жидкостей вычисляются либо координаты отдельных частиц жидкости, рассматриваемых как материальные частицы, сплошь заполняющие объем (представление Лагранжа), либо скорости этих частиц в пространстве, заполненном движущейся жидкостью (представление Эйлера). Представлением Лагранжа пользуются в основном при описании колебательных явлений в жидкости.

Теоретическая аэродинамика базируется на общих уравнениях гидроаэромеханики. При этом для изучения сравнительно простых вопросов движения жидкости или газа вокруг тел и давления потока на них в аэродинамике используют уравнения движения несжимаемой (для малых скоростей) или сжимаемой (для больших скоростей) идеальной жидкости. При рассмотрении более сложных вопросов применяют уравнения движения вязких жидкостей (см. *Вязкость*).

Главная проблема экспериментальной гидроаэромеханики — изучение взаимодействия жидкостей и газов с твердыми телами, движущимися или покоящимися в них. В основе экспериментальных методов лежат либо аналогии, существующие между движением жидкости и газа и физическими процессами, удобными для воспроизведения, либо моделирование. Изучение потока жидкости или газа в уменьшенном масштабе ведут в аэродинамических трубах, опытовых бассейнах и т. д.



Гидроаэростатика как часть гидроаэромеханики определяет, с какой силой находящиеся в равновесии жидкости или газы действуют на стенки сосуда, а также на погруженные в них тела. Основные законы гидроаэростатики — закон Паскаля: давление на поверхность жидкости (или газа), произведенное внешними силами, передается жидкостью (или газом) одинаково во всех направлениях; закон Архимеда: на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) сила, направленная вверх, приложенная к центру тяжести вытесненного объема и равная по величине весу вытесненной телом жидкости (или газа).

Первые представления из области гидроаэромеханики возникли еще в древние времена, поскольку они были необходимы людям в их практической деятельности: в строительстве колодцев, каналов, плотов, лодок, изобретении таких сравнительно сложных по тем временам гидро- и аэродинамических устройств, как весло, парус, насос и др.

Важной проблемой гидроаэромеханики с самого ее возникновения стало изучение взаимодействия между средой (водой, воздухом) и движущимися или покоящимися в ней телами. В III в. до н. э. Архимед открыл основной

Как объяснить полет самолета или движение корабля на подводных крыльях? — Для этого надо знать законы гидроаэродинамики. Они играют важную роль во всех случаях, когда тело быстро движется в воздушной либо водной среде. Знание этих законов позволяет найти нужную форму движущегося тела — снаряда, самолета, гоночного автомобиля. Законы гидроаэродинамики должен учитывать и лыжник, стремительно спускающийся по склону горы

закон гидроаэростатики и создал теорию равновесия жидкостей и газов. Его труды послужили основой для создания ряда гидравлических аппаратов, в частности поршневых насосов.

В эпоху Возрождения Леонардо да Винчи, разрабатывая проекты каналов и ирригационных систем, изучал условия равновесия жидкостей. Наблюдая полеты птиц, он открыл существование сопротивления среды.

В XVII в. французский ученый Б. Паскаль при изучении давления жидкостей и газов установил, что в данной точке жидкости и газа давление действует с одинаковой силой во всех направлениях, и сформулировал закономерности передачи давления жидкостями и газами.

Первое теоретическое определение закона сопротивления среды принадлежит И. Ньютону, который объяснял сопротивление тела при движении его в жидкости или газе ударами частиц об его лобовую часть. По величине оно равно: $R = S\rho v^2$, где R — сопротивление, S — площадь наибольшего поперечного сечения, ρ — плотность жидкости или газа, v — скорость движения тела (или потока).

Однако на практике величина R, рассчитанная по формуле Ньютона, отличается от значения, полученного на опыте, например, в аэродинамической трубе, так как формула Ньютона не учитывает обтекания тел. В связи с этим в нее вводится поправочный коэффициент C_x, который показывает, во сколько раз сопротивление тела отличается от рассчитанного по формуле: $C_x = \frac{R}{S\rho v^2}$. Для тел различной формы (например, пластины, шара и т. д.)

ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В СТРУЕ

Многие опыты, объяснение которых основано на уравнении Бернулли, вероятно, знакомы читателю. Мы только напомним их.

Мячик для настольного тенниса, помещенный в вертикальную струю воздуха (чаще всего для этого используют пылесос, включенный таким образом, чтобы воздух «дул» из его трубки), парит в этой струе, вертится, колеблется, но не вылетает из нее. Это объясняется тем, что при смещении мячика на него начинают действовать силы давления со стороны окружающего воздуха, возвращающие его в область пониженного давления — в струю.

Если рядом с зажженной свечой поместить конец трубки так, как это показано на первом рисунке, и дуть в трубку, то пламя свечи смещается в сторону движущегося воздуха, втягивается в струю.

Наконец, если склеить из бумаги трубку диаметром 1 см и на конце ее приклеить круглую площадку (второй рисунок), то с помощью такой несложной конструкции можно поднять со стола лист бумаги.

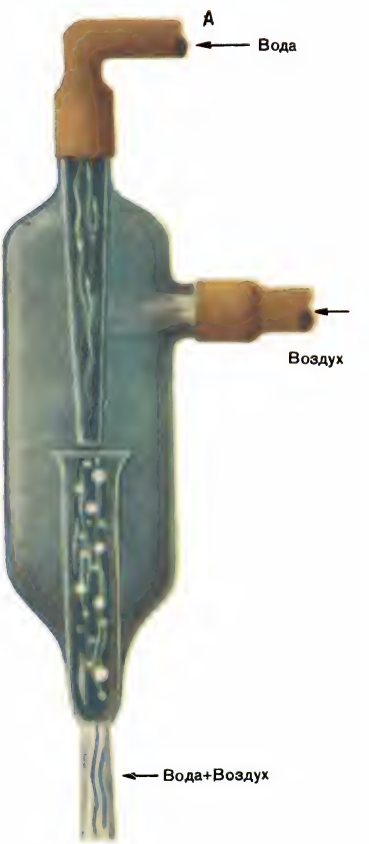
Для этого надо поднести площадку к листу и подуть в трубку. Лист «прилипает» к площадке. (Важно только, чтобы поверхность стола была шероховатой.)

ВОДЯНОЙ НАСОС

Еще одно применение подсасывающего действия струи — водяной насос.

Вода из трубки *А* движется с большой скоростью через воздушный промежуток, увлекая за собой воздух. С помощью такого насоса можно получить довольно значительное разрежение. Обычно в школьном кабинете физики или химии есть стеклянный насос, изображенный на нашем рисунке. Дома можно сделать комбинированный насос, используя для этого спаянный из жести кожух, резиновые пробки и металлические трубочки. Конструкцию предоставляем разработать самим читателям. Надо только помнить, что все соединения должны быть герметичными. После пайки их можно промазать пластилином. Откачивая воздух, надо пользоваться трубками из толстой резины, иначе под действием атмосферного давления они сожмутся, и насос не сможет работать.

С помощью водяного насоса можно производить самые разные физические опыты, в которых требуется пониженное давление.



C_x имеет свое постоянное значение, определяемое на опыте.

Следующим крупным вкладом в развитие гидроаэромеханики явилась работа швейцарского ученого Д. Бернулли «Гидродинамика» (1738), в которой он сформулировал закон, до сих пор имеющий важное практическое применение. Согласно этому закону, давление текущей жидкости больше в тех сечениях потока, в которых скорость его движения меньше, и наоборот, в тех сечениях, в которых скорость его движения больше, давление меньше.

В работе Л. Эйлера «Общие принципы движения жидкостей» (1755) были впервые выведены основные уравнения движения идеальной жидкости и дано динамическое определение понятия *давления*.

В XIX в. общая теория движения твердого тела в жидкости разрабатывалась целым рядом ученых — Г. Кирхгофом, У. Томсоном, Дж. Максвеллом, Н. Е. Жуковским, С. А. Чаплыгиным, А. М. Ляпуновым и другими. Зарождение авиации дало мощный толчок к развитию специального раздела гидроаэромеханики — аэродинамики. Появились работы Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, Ф. Ланчестера, Л. Прандтля по теории движения крыла и винта самолета и всего самолета в целом.

В первой половине XIX в. зародились две новые ветви гидроаэромеханики — динамика вязкой жидкости и газовая динамика.

Основы динамики вязкой жидкости были заложены в 1820-х гг. французским ученым А. Навье и получили свое завершение в работах английского физика Дж. Стокса. Сформулированный в 1851 г. закон Стокса определяет силу сопротивления F, испытываемую твердым шаром при его медленном поступательном движении в вязкой жидкости: $F = 6\pi\eta rv$, где η — коэффициент вязкости жидкости, r — радиус шара, v — его скорость. Этот закон используют в молекулярной физике, коллоидной химии, метеорологии. С его помощью можно определить скорость осаждения мелких капель тумана, коллоидных частиц. Его используют для определения коэффициента вязкости очень вязких жидкостей.

Фундаментальное значение для развития газовой динамики имела работа С. А. Чаплыгина «О газовых струях» (1902).

Современная гидроаэромеханика — разветвленная наука, состоящая из множества подразделов, тесно связанная с другими науками — математикой, физикой, химией. Методами гидроаэромеханики решаются разнообразные технические задачи авиации, ракетной техники и т. д.

Теоретические и экспериментальные исследования в области гидроаэромеханики в нашей стране проводятся в ряде институтов и научных центров, и в частности в Центральном аэрогидродинамическом институте, созданном в 1918 г. в Москве.

ГИРОСКОП

Атомный ледокол прокладывает путь караван судов вблизи магнитного полюса Земли. Самолет заходит на посадку в тумане. Искусственный спутник Земли разворачивается к Солнцу панелями солнечных батарей... Все эти и многие другие процессы помогает совершить гироскоп — осесимметричное тело, быстро вращающееся вокруг своей геометрической оси. Простейшим примером этого прибора служит знакомая всем игрушка — волчок.

ВРАЩАЮЩЕЕСЯ ЯЙЦО

Существуют волчки самых причудливых форм и конструкций, поведение которых весьма интересно. Мы опишем два таких волчка.

Первый — обычное крутое яйцо. Хорошо известно, что отличить сырое яйцо от вареного можно, завертев его. Из-за трения жидких слоев внутри сырого яйца оно быстро останавливается. Яйцо, сваренное вкрутую, может вращаться довольно долго. Если сильно завертеть такое яйцо на гладкой горизонтальной поверхности, оно поднимется вертикально и будет вращаться в таком положении, пока движение не замедлится.

ВОЛЧОК ТОМСОНА

Второй тип волчка называется волчком Томсона (по имени английского ученого, разработавшего ряд вопросов теории гироскопов). Его можно сделать самим, отрезав часть деревянного шарика и закрепив в центре сечения небольшую ножку (см. рис.). Приведя за ножку волчок во вращение, мы увидим, что он быстро перевернется и будет вращаться в самом, казалось бы, неустойчивом положении — стоя на ножке. Такое поведение волчка связано с тем, что, касаясь боком поверхности, он испытывает трение. Сила трения вызывает прецессию, пока волчок не перевернется в положение, при котором он вращается на остром конце (яйцо) либо стоя на ножке (волчок Томсона).

Раскрутите волчок в вертикальном положении на какой-нибудь гладкой горизонтальной площадке, скажем табуретке. Если это сделать аккуратно, то после некоторого переходного процесса его движение установится и волчок станет вращаться вокруг своей оси, расположенной вертикально (перпендикулярно подставке). Начните теперь медленно наклонять подставку, превращая ее тем самым в наклонную плоскость. Легко заранее предсказать, как при этом должно вести себя тело, находящееся на ней. До некоторых пор, пока сила трения компенсирует возникающую скатывающую силу, тело будет пребывать в покое в прежнем положении относительно подставки, поворачиваясь вместе с ней. Когда же величина скатывающей силы превысит предельно возможное значение силы *трения*, тело начнет соскальзывать. Так ведут себя обычные тела, но только не волчок. Наклоняя подставку, вы обнаружите, что волчок начинает с нее «сбегать», сохраняя при этом прежним направление своей оси в пространстве.

Такое необычное поведение волчка связано с тем фактом, что в рассматриваемом нами случае вращающийся волчок обладает неизменным моментом количества движения (см. *Момент инерции, Симметрия законов природы*), вектор которого направлен вдоль оси вращения волчка. Действительно, момент количества движения системы может изменяться только под воздействием вращающего момента внешних сил. В нашем же случае сила тяжести направлена по оси вращения волчка, а сила реакции опоры и сила трения приложены в лежащей на этой же оси точке касания волчка с подставкой. Поэтому все моменты внешних сил относительно этой точки оказываются равными нулю при любом поло-

Дети любят запускать волчок. Им нравится наблюдать, как надолго застывает в пространстве ось вращающегося волчка. Они и не подозревают, что эта удивительная игрушка есть упрощенная модель важнейшего навигационного прибора - гироскопа. Способность гироскопа сохранять неизменным направление оси вращения используется при управлении движением современных кораблей, подводных лодок, самолетов, ракет, искусственных спутников Земли.

жении подставки, и вектор момента количества движения сохраняет свою величину и направление в пространстве, а значит, неизменным остается и направление в пространстве оси волчка.

Такое свойство гироскопа оказывается чрезвычайно важным при конструировании навигационных приборов, поскольку позволяет связать с гироскопом инерциальную систему координат (или, как говорят, систему координат, неподвижную относительно звезд), сориентировав ее оси относительно неподвижной оси вращения свободного гироскопа. Для удержания гироскопа свободным обычно используют так называемый **карданов подвес** (рис. 1). Он состоит из двух колец, внешнее из которых свободно поворачивается вокруг оси, проходящей через острия AA^1 (или подшипники), а внутреннее — вокруг перпендикулярной к ней оси, проходящей через острия BB^1. Ось CC^1 гироскопа опирается на внутреннее кольцо карданова подвеса, что обеспечивает ей возможность свободно поворачиваться в пространстве в любых направлениях.

Еще более удивительно ведет себя гироскоп под воздействием вращающего момента внешней силы. Если к нему приложить пару сил $\vec{F}$ и $\vec{F}^1$, стремящуюся повернуть его вокруг оси AA^1, перпендикулярной к оси его собственного вращения OO^1 (рис. 2), то он станет поворачиваться относительно третьей оси BB^1, перпендикулярной первым двум. Такое движение

Рис. 1. Гироскоп в карданном подвесе.

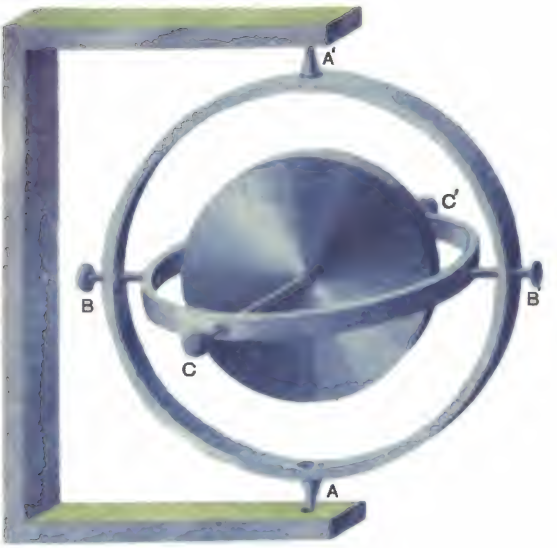
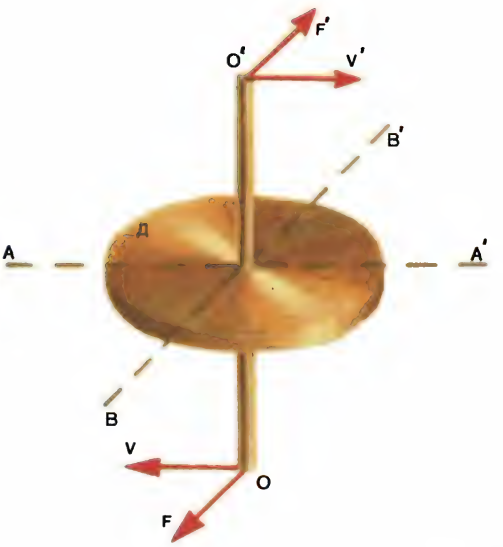


Рис. 2. Схема прецессии гироскопа.



оси собственного вращения гироскопа под действием момента внешней силы называют прецессией. Интересно, что угловая скорость прецессии оказывается пропорциональной величине внешнего момента силы.

Для наблюдения прецессии раскрутите волчок и установите его так, чтобы его ось вращения составляла некоторый угол с вертикалью (рис. 2). Тогда сила тяжести создаст вращающий момент относительно точки *O*, под воздействием которого волчок начнет прецессировать.

ГОЛОГРАФИЯ

В Политехническом музее в Москве в отделе голографии всегда много любопытных. Включают лампы подсветки, и неожиданно из плоских пластин, висящих на стенах, «выходят наружу» старинные кубки, статуэтки, оружие. Внешне они ничем не отличаются от настоящих. Их можно осмотреть с разных сторон, они объемны.

Трудно представить, что эти изображения содержатся в эмульсии фотопластинок. Если рассматривать голограмму через микроскоп, то будет видна структура из темных и светлых участков, и только... Тем не менее, освещая такую пластинку, мы полностью восстанавливаем фронт световой волны, отраженной когда-то предметом.

Главное при получении голограммы — монохроматический и когерентный лазерный луч (см. *Лазер*). Фотопластинка освещается опорным лазерным лучом и одновременно светом, отраженным от предмета. Возникает в плоскости пластинки интерференционная картина (рис. 1) (см. *Интерференция*). В ней содержится вся информация об отраженной световой волне. Если теперь проявить пластинку и осветить лазерным лучом опорного пучка, то волновой фронт восстановится благодаря *дифракции* лазерного пучка на голограмме (рис. 2).

Интерференционная картина в большом объеме пространства возможна только при освещении предмета когерентными пучками. Поэтому голография начала развиваться с появлением в 1960-х гг. источников света высокой когерентности — *лазеров*. В 1948 г., когда английский ученый Д. Габор предложил голографический метод получения изображений, о нем знали лишь немногие специалисты. Ныне голография — одна из важнейших областей *оптики*.

Существуют различные способы получения голограмм. Один из самых интересных — способ, предложенный советским ученым Ю. Н. Денисюком. Запись голограммы ведется на фотопластинку с толстым слоем эмульсии, таким, что его толщина намного больше длины световой волны. Интерференционная картина предметного и опорного пучков возникает в толще эмульсии. В Политехническом музее представлены именно такие голограммы. Они воспроизводят изображение предмета при освещении обычным осветителем или солнечным светом. Структура такой голограммы сама «выбирает» лучи, нужные для восстановления волнового фронта.

Голограммы нужны не только для воссоздания образов предметов. Они помогают записывать громадное количество информации, их применяют для исправления аберраций (погрешностей изображения) оптических систем, для контроля за вибрациями машин.

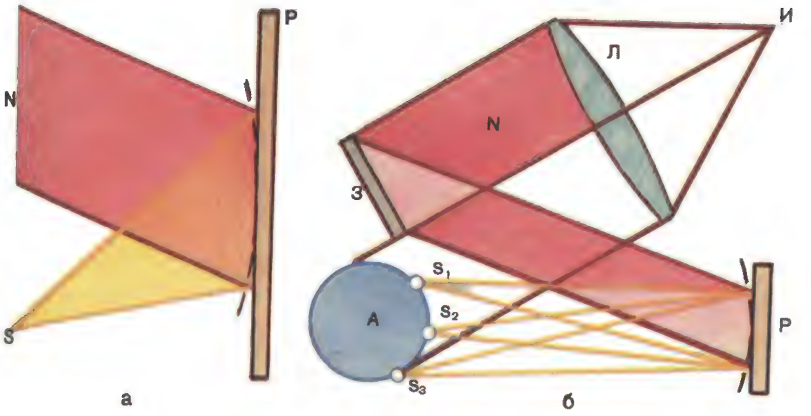


Рис. 1. Запись голограммы. а) Запись волнового фронта точечного источника *S*. *P* — фотопластинка; *N* — опорный пучок. б) Запись голограммы объекта, отражающего свет. *И* — источник когерентного света; *Л* — линза; *З* — зеркало; *P* — фотопластинка; *A* — объект; *N* — опорный пучок.

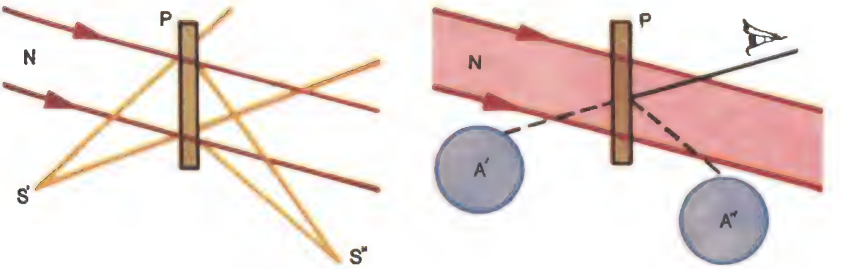


Рис. 2. Восстановление и наблюдение изображения объекта: A′ — мнимое изображение; A″ — действительное изображение; *N* — восстанавливаемый лазерный луч; *P* — фотопластинка.

Теоретический расчет дает зависимость: на единице площади голограммы регистрируется $N = 1/\lambda^2$ независимых сведений о предмете. Таким образом, на 1 см ^{2} голограммы, полученной с помощью излучений гелий-неонового лазера ($\lambda = 0{,}632$ мкм), приходится 250 млн. независимых сведений. Большое число сведений, содержащихся в голограмме, проявляется в сложности ее структуры. Человек воспринимает сильно увеличенный участок голограммы как хаотический набор пятнышек с различной степенью почернения. Такое впечатление объясняется неспособностью зрения извлечь из голограммы вполне закономерно заложенные в ней сведения о предмете. Восстановление голографического изображения — это преобразование сведений из одной формы в другую, более удобную для восприятия человеком или для введения их в ЭВМ. Время восстановления голограммы очень мало (до 10^{-10} с). Следовательно, голография позволяет записывать, хранить и очень быстро преобразовывать громадное количество данных.

Эти особенности голографии используют для решения многих технических и научных проблем. Так, голографическая интерферометрия дала возможность интерференционными методами исследовать объекты, диффузно рассеивающие свет, например покрытые коррозией металлические конструкции, бетонные балки, покрышки автомобилей и т. п. Если требуется изучить деформации такого объекта, с помощью голограммы восстанавливают его трехмерное изображение и совмещают с самим объектом. При этом объект и голограмма освещены точно так же, как и во время получения голограммы. Теперь свет изображения и свет, отраженный предметом, интерферируют, так как они когерентны. Если объект немного изменил свою форму, то наблюдается разность хода между лучами голографического изображения и отраженными объектом. В результате возникают интерференционные полосы, характеризующие изменение формы объекта. Существует и другая возможность наблюдения голографической интерференции. На фотопластинку последовательно «записывают» две голограммы предмета в двух его разных состояниях. При просвечивании «двойной» голограммы восстановленные волны изображений интерферируют, и на поверхности предмета возникает, как и в первом случае, картина, характеризующая изменение его состояния.

Голограммы можно получать и с помощью звуковых волн. Когерентные звуковые волны известны давно, и ультразвуком можно «освещать» очень большие объекты. Принципы получения звуковой и оптической голограмм одни и те же, только вместо изменений интенсивности света ученые имеют дело с изменением *давления*. Звуковые волны без труда проникают в непрозрачные для света предметы. Акустическая голография в перспективе может найти применение в медицине, геофизике, металлургии. Врач с помощью такой голограммы сможет осмотреть внутренние органы человека, а геофизик — заглянуть в недра Земли.

Д

ДАВЛЕНИЕ

Как вы думаете, можно ли рукой произвести действие, хотя бы в несколько раз большее, чем оказывает тяжелый гусеничный трактор на почву?

Оказывается, всякий человек проделывал это неоднократно, например, вдавливая кнопку в доску. Сила, с которой он при этом действовал, не велика — около 50 Н (а вес гусеничного трактора ДТ-75 М — 65 000 Н). Но все дело в том, что результат действия силы зависит не только от ее модуля, но и от площади, перпендикулярно которой она действует. Площадь острия кнопки 0,1 мм^2, площадь гусениц трактора 1,4 м^2. Следовательно, на единицу площади поверхности в первом случае действует сила примерно в 10 000 раз больше; сравните

$$\frac{50\ \text{Н}}{0{,}1 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^2} \text{ и } \frac{65\,000\ \text{Н}}{1{,}4\ \text{м}^2}.$$

Величина, характеризующая интенсивность нормальных (перпендикулярных к поверхности) сил, с которыми одно тело действует на поверхность другого, называется *давлением*. Например, давление трактора на грунт, воды на основание плотины, газа в цилиндре внутреннего сгорания на поршень.

Если силы распределяются по поверхности равномерно, то давление p на любую часть поверхности равно $p = F/S$, где S — площадь этой части, F — сумма приложенных перпендикулярно к ней сил. При неравномерном распределении сил равенство $p = F/S$ определяет среднее давление на данную площадку S.

В случае равномерного распределения сил давление во всех точках поверхности одинаково, а в случае неравномерного — меняется от точки к точке.

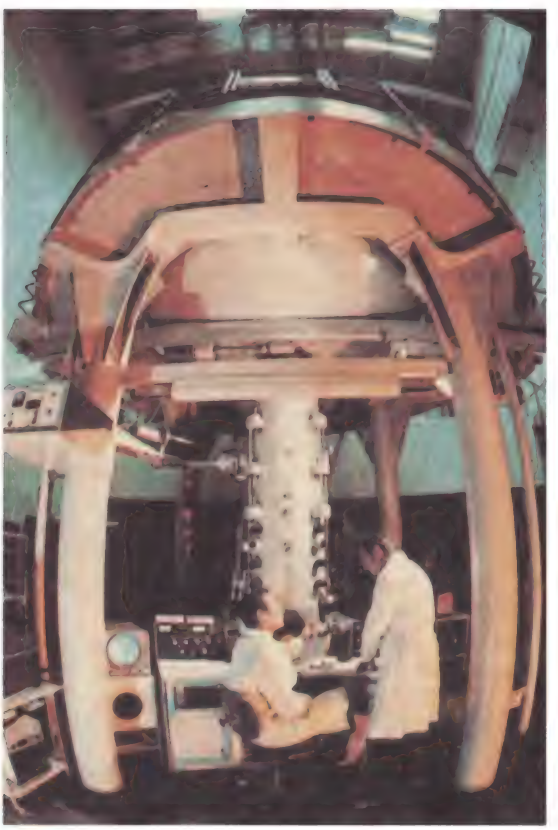
Особую роль понятие давления играет в гидроаэростатике (см. *Гидроаэромеханика*), это связано с особенностями строения *жидкостей* и *газов*. Известно, что газы заполняют весь предоставленный им объем. При этом вследствие теплового движения молекулы газа сталкиваются друг с другом, со стенками сосуда, с поверхностью любого тела, которое находится в газе. Происходит передача импульса, которая и определяет давление газа на стенки сосуда, на поверхность любого тела, находящегося в газе.

Молекулярно-кинетическая теория газов позволяет вычислить давление газа: $p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$, где m_0 — масса молекулы, n — число молекул в единице объема, $\bar{v}^2$ — средний квадрат скорости движения молекул. Так как средняя кинетическая энергия молекулы газа $\frac{m\bar{v}^2}{2}$, то формулу для вычисления давления можно представить в виде: $p = \frac{2}{3} n\bar{E}$, т. е. давление газа определяется кинетической энергией его частиц. С увеличением температуры возрастает скорость, а следовательно, и кинетическая энергия молекул. Значит, давление газа увеличивается с ростом температуры. Эта закономерность была экспериментально установлена французским физиком Ж. Шарлем в 1787 г. и носит название з а к о н а Ш а р л я — давление данной массы газа при постоянном объеме пропорционально абсолютной температуре:

$$\left(\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}\right)$$

Английским ученым Р. Бойлем в 1662 г. и независимо от него французским ученым Э. Мариоттом в 1676 г. был экспериментально установлен закон, получивший название з а к о н а

Давление широко используют в технике. С помощью мощных прессов обрабатывают различные материалы, а также исследуют их свойства.



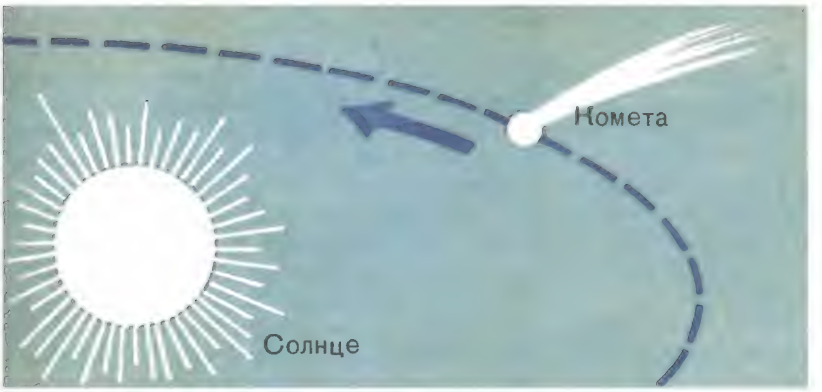


Рис. 1. Образование хвостов комет.

Рис. 2. Если энергия фотона $E = h\nu$, то его импульс $\bar{p} = \frac{E}{c}\bar{i}$.

При отражении от поверхности импульс фотона изменяется на величину $2\bar{p}: \bar{p} - (-\bar{p}) = 2\bar{p}$.

Бойля — Мариотта, — для данной массы газа при постоянной температуре давление обратно пропорционально объему: $\left(\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}\right)$.

Одно из характерных свойств жидкостей и газов — их текучесть. Именно она определяет особенности передачи давления жидкостями и газами: давление, производимое на жидкость или газ, передается без изменения в каждую точку жидкости или газа (закон Паскаля).

На жидкости и газы, как и на все тела на Земле, действует сила тяжести (см. *Тяготение*). Давление, создаваемое жидкостями и газами вследствие их веса, определяется по формуле $p = \rho g h$, где ρ — плотность, h — высота столба жидкости или газа.

В системе СИ давление измеряется в $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ (в честь французского ученого XVII в. Б. Паскаля эта единица называется паскалем — обозначается Па).

На практике используются также следующие единицы: 1 гПа = 100 Па, 1 кПа = 1000 Па, атм — атмосфера физическая, ат — атмосфера техническая, мм рт. ст. — миллиметр ртутного столба, где сравнивается измеряемое давление с давлением столба ртути, и др.

Приборы для измерения давления: манометры, барометры, вакуумметры, датчики давления, в которых давление жидкости или газа преобразуется в электрический, пневматический или другого вида входной сигнал.

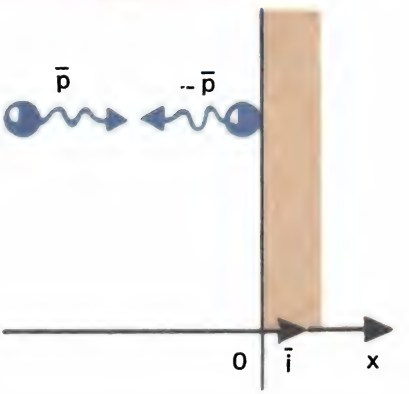
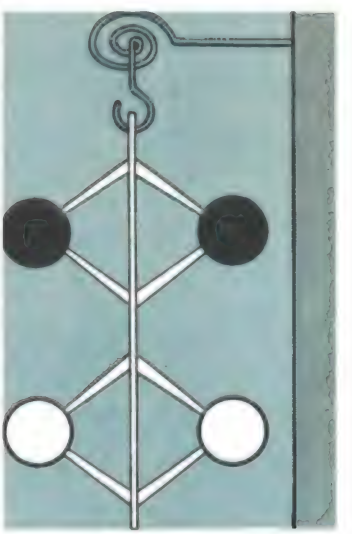


Рис. 3. С помощью системы крылышек П. Н. Лебедев впервые измерил давление света.



ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Свет не только поглощается и отражается веществом, но и создает давление на поверхность тела. Еще в 1604 г. немецкий астроном И. Кеплер объяснял форму хвоста кометы действием светового давления (рис. 1). Английский физик Дж. Максвелл 250 лет спустя вычислил световое давление на тела, использовав разработанную им теорию электромагнитного поля. По расчетам Максвелла выходило, что если за 1 с перпендикулярно единичной площадке с коэффициентом отражения R падает световая энергия E, то свет оказывает давление p, выражающееся зависимостью: $p = \frac{E}{c}(1 + R)\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, где c — скорость света. Эту формулу

можно получить также, рассматривая свет как поток *фотонов*, взаимодействующих с поверхностью (рис. 2).

Некоторые ученые сомневались в теоретических расчетах Максвелла, а опытным путем проверить полученный им результат долгое время не удавалось. В средних широтах в солнечный полдень на поверхности, отражающей полностью световые лучи, создается давление, равное всего $4{,}7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Впервые световое давление в 1899 г. измерил русский физик П. Н. Лебедев. Он подвесил на тонкой нити две пары крылышек: поверхность у одной из них была зачерненной, а у другой — зеркальной (рис. 3). Свет практически полностью отражался от зеркальной поверхности, и его давление на зеркальное крылышко было вдвое большим ($R = 1$), чем на зачерненное ($R = 0$). Создавался момент сил, поворачивающий устройство. По углу поворота можно было судить о силе, действовавшей на крылышки, а значит измерить световое давление.

Опыт осложняют посторонние силы, возникающие при освещении устройства, которые по величине превосходят в тысячи раз давление света, если не принять особых предосторожностей. Одна из таких сил связана с радиометрическим эффектом. Этот эффект возникает благодаря разности температур освещенной и темной сторон крылышка. Нагретая светом сторона отражает молекулы остаточного газа с большей скоростью, чем более холодная, неосвещенная сторона. Поэтому молекулы газа передают освещенной стороне больший импульс и крылышки стремятся повернуться в том же направлении, что и под действием светового давления, — возникает ложный эффект. Радиометрическое действие П. Н. Лебедев свел к минимуму, изготовив крылышки из тонкой, хорошо проводящей тепло фольги и поместив их в вакууме. В результате уменьшились и разница в импульсах, передаваемая отдельными молекулами черной и блестящей поверхностей (благодаря меньшему перепаду температур между ними), и общее число молекул, падающих на поверхности (благодаря малому давлению газа).

ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ (1866 — 1912)

Русский физик. Родился в Москве, в купеческой семье. В 1887 — 1891 гг. изучал физику в Германии, в университетах Страсбурга и Берлина. Возвратившись на родину, П. Н. Лебедев начал преподавать в Московском университете. Здесь в его лаборатории проводил научные исследования по единому плану первый крупный (около 30 человек) коллектив русских ученых.

В это время П. Н. Лебедев увлекся проблемой образования хвостов комет. Еще И. Кеплер и И. Ньютон предполагали, что отклонение кометных хвостов в сторону, противоположную Солнцу, вызывается механическим давлением солнечного света. Многочисленные попытки обнаружить это давление в экспериментах, начатые еще в XVIII в., оказались безуспешными. Из электромагнитной теории света, разработанной английским физиком Дж. Максвеллом, следовало, что давление света имеет ничтожно малую величину.

Работая в необычайно тяжелых условиях, П. Н. Лебедев на собственные средства создал экспериментальную установку, с помощью которой с абсолютной достоверностью впервые было точно измерено *давление света* на поверхности *твердых тел*. Оно оказалось в строгом соответствии с теорией Максвелла. В 1900 г. Лебедев сделал доклад о своих опытах на Международном конгрессе физиков в Париже. Открытие светового давления принесло ему мировую известность.

Следующие 10 лет ученый посвятил доказательству существования еще более слабого давления света на *газы*, блестяще закончив эту работу в 1910 г.

К числу других важных работ Лебедева относятся исследования миллиметровых радиоволн и природы земного магнитного поля.

В 1911 г. Лебедев вместе с несколькими прогрессивными учеными ушел из Московского университета в знак протеста против реакционных действий царского министра просвещения. Однако он отказался от приглашения шведского ученого С. Аррениуса работать в Нобелевском институте в Стокгольме и решил создать на частные средства новую физическую лабораторию в Москве.

В его лаборатории действовал физический коллоквиум — первый в России еженедельный научный семинар по проблемам физики. Участники этого коллоквиума образовали талантливую научную школу московских физиков-экспериментаторов — первую научную школу физиков в России. Имя П. Н. Лебедева носит Физический институт Академии наук СССР.

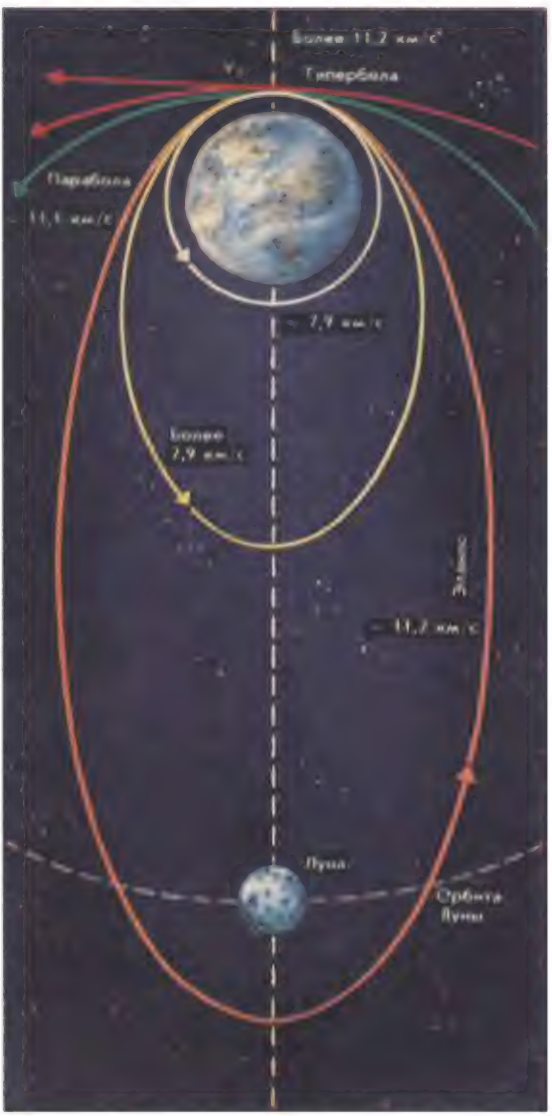
Экспериментальные исследования Лебедева подкрепили предположение Кеплера о природе кометных хвостов. С уменьшением радиуса частицы притяжение ее Солнцем убывает пропорционально кубу, а световое давление — пропорционально квадрату радиуса. Частицы малого размера будут испытывать отталкивание от Солнца независимо от расстояния r от него, так как плотность излучения и гравитационные силы притяжения убывают по одинаковому закону $1/r^2$. Световое давление ограничивает предельный размер звезд, существующих во Вселенной. С увеличением массы звезды растет тяготение ее слоев к центру. Поэтому внутренние звездные слои сильно сжимаются, и их температура возрастает до миллионов градусов. Естественно, что при этом значительно увеличивается направленное наружу световое давление внутренних слоев. У нормальных звезд возникает равновесие между гравитационными силами, стабилизирующими звезду, и силами светового давления, стремящимися ее разрушить. Для звезд очень большой массы такого равновесия не наступает, они неустойчивы, и их не должно быть во Вселенной. Астрономические наблюдения подтвердили: самые «тяжелые» звезды обладают как раз той предельной массой, которую еще допускает теория, учитывающая равновесие гравитационного и светового давления внутри звезд.

ДВИЖЕНИЕ

Движение в широком смысле этого слова охватывает, по словам Ф. Энгельса, «все происходящие во вселенной изменения и процессы, начиная от простого перемещения и кончая мышлением». При таком понимании движение есть способ существования *материи*. Весь окружающий нас мир — это движущаяся материя. Материя и движение неотделимы друг от друга, не существует материи без движения, как не существует и движения без материи.

Движение неразрывно связано также с основными формами существования материи — *временем* и *пространством*. В. И. Ленин в своих «Философских тетрадях» писал: «Движение есть сущность времени и пространства... Движение есть единство непрерывности (времени и пространства) и прерывности (времени и пространства). Движение есть противоречие, есть единство противоречий».

Диалектический (противоречивый) характер движения, заключающийся в неразрывном единстве двух противоположных моментов — изменчивости и устойчивости, движения и покоя, вызывал споры о сущности движения, пространства и времени еще среди ученых древнего мира. Анализируя диалектическую природу движения, вскрытую в V в. до н. э. древнегреческим философом Зеноном, немецкий ученый Г. Гегель в первой четверти XIX в. писал: «Когда мы вообще рассуждаем о движении, то мы говорим: тело находится в одном месте и затем оно переходит в другое место. В то время, как оно движется, оно не находится больше в первом месте, но не находится также и во втором... Двигаться же означает быть в этом месте, и в то же время не быть в нем; это — непрерывность пространства и времени, и она-то именно и делает возможным движение».



Если скорость космического корабля 7,9 км/с и направление движения параллельно поверхности Земли, то корабль становится спутником Земли, движущимся по круговой орбите на сравнительно небольшой высоте. При скорости, лежащей между 7,9 и 11,1 км/с, орбита корабля будет эллиптической. При скорости 11,2 км/с корабль будет двигаться по параболе, а при еще большей скорости — по гиперболе.

В. И. Ленин, записав эту мысль в своих «Философских тетрадях», подчеркнул последнюю фразу двойной чертой и отметил на полях: «NB верно!»

Современная наука рассматривает следующие основные формы движения: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную, химическую, биологическую. Каждая из перечисленных форм движения имеет свои особенности, свои закономерности и не может быть сведена к какой-либо одной из них. В то же время многие формы движения связаны между собой, не существуют изолированно одна от другой. Так, например, жизнь невозможна без разнообразных физических и химических изменений в организмах.

Единство и связь различных форм движения материи проявляются в их способности к взаимному превращению друг в друга. Количественным выражением этой способности является *закон сохранения энергии.*

Одна из форм движения — механическое движение — изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени. Механическое движение можно классифицировать разными способами. Положив в основу классификации вид траектории, будем рассматривать прямолинейные и криволинейные движения. Криволинейными называют движения тел по окружности, эллипсу, параболе и гиперболе. Именно по таким траекториям движутся все тела под действием силы *тяготения.*

Положив в основу классификации движения

ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ (1564 — 1642)

Выдающийся итальянский физик и астроном Галилео Галилей родился в Пизе. До 11 лет он посещал школу. Затем, по обычаю того времени, воспитание и образование его проходило в монастыре, где он познакомился с трудами латинских и греческих писателей. В 1581 г. Галилей поступил в Пизанский университет для изучения медицины. Здесь он впервые прочел сочинения Аристотеля, Евклида, Архимеда. Увлеченный математикой и механикой, он оставил университет и четыре года изучал математику во Флоренции. В это время появились его первые научные труды, связанные с гидростатикой (он изобрел весы для определения состава металлических сплавов) и исследованием роли центра тяжести в *движении* тел.

С 1589 г. Галилей преподавал математику сначала в Пизе, затем — в Падуе, продолжая научные исследования. Падуанский период жизни Галилея (1592—1610) — время наивысшего расцвета его научной деятельности. Он открыл закон *инерции*, по которому тело, если на него не действуют никакие силы, находится в покое или движется прямолинейно и равномерно сколь угодно долгое время. Галилей изучает законы свободного падения тел, движения по наклонной плоскости, движения тела, брошенного под углом к горизонту. Он устанавливает закон, по которому происходят колебания маятника. Оказалось, что период *колебаний* не зависит от амплитуды. Это свойство маятников получило название изохронности.

В 1609 г. Галилей построил свой первый телескоп с 3-кратным увеличением, а вскоре телескоп с увеличением в 32 раза, при помощи которого он открыл горы на Луне, фазы Венеры, спутники Юпитера, пятна на поверхности Солнца и его собственное вращение, обнаружил много новых звезд. Церковники объявили, что все виденное им — оптический обман, что его наблюдения ошибочны. Но Галилей продолжал оставаться сторонником учения Н. Коперника о гелиоцентрической системе мира.

В 1616 г. католическая церковь официально объявила учение Коперника ересью и запретила его упоминание. В течение нескольких лет Галилей вынужден был молчать об учении Коперника или говорить о нем намеками. В 1632 г. он опубликовал свою замечательную книгу «Диалог о двух главнейших системах мира», в которой излагаются материалистические идеи в форме дискуссии между тремя собеседниками. Церковь запретила эту книгу, а ее автора привлекла к суду и под угрозой пыток принудила публично отречься от своих взглядов. В течение 9 лет Галилей считался узником инквизиции.

В 1637 г. он ослеп, но продолжал научную работу до последних дней жизни.

Научная деятельность Галилея оказала большое влияние на дальнейшее развитие *механики, оптики,* астрономии.

характер изменения скорости, получим равномерные и неравномерные движения. Один из видов неравномерного движения — равноускоренное движение, т. е. движение с постоянным ускорением. Распространен в природе и широко применяется в технике особый вид неравномерного движения, который получил название колебательного (см. *Колебания*).

В школьном курсе физики дается строгое кинематическое описание следующих видов движения:

Виды движения	Характеристики движения		
	Скорость, v	Ускорение, a	Координаты, x или φ
1. Равномерное прямолинейное движение	Постоянна по модулю и направлению	Равно нулю	$x = x_0 + vt$
2. Равномерное движение по окружности	Постоянна по модулю, но изменяется по направлению	$a = \frac{v^2}{R}$	$\varphi = \varphi_0 + \frac{v}{R} t$
3. Равноускоренное прямолинейное движение	$v_x = v_{ox} + at$	Постоянно по модулю и направлению	$x = x_o + v_{ox}t + \frac{a_x t^2}{2}$
4. Гармоническое колебательное движение	Изменяются по модулю и направлению $v_x = -v_м \sin\omega t$	$a_x = -a_м \cos\omega t$	$x = x_м \cos\omega t$

Примерами механического движения могут служить движения планет и Земли вокруг Солнца, движения Луны и искусственных спутников Земли вокруг Земли, падение тел на Землю, движение разных видов транспорта, вращательные и колебательные движения разнообразных деталей машин и механизмов, всевозможные движения в мире живой природы.

В приведенном выше определении механического движения подчеркнута его относительность. Дискуссии ученых об относительности движения велись на протяжении столетий. Об этом, в частности, говорится в полушутливом и в то же время очень мудром стихотворении А. С. Пушкина:

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

В первой части своего стихотворения Пушкин описывает спор древнегреческих ученых о сущности движения. Во второй части он имеет в виду существование двух противоположных систем мира — геоцентрической и гелиоцентрической, созданных К. Птолемеем и Н. Коперником. Не напрасно упомянут здесь Г. Галилей, который внес важный вклад в утверждение научной, гелиоцентрической системы мира Н. Коперника, открыв в первой половине XVII в. принцип относительности.

Это один из первых научных физических принципов. Он утверждает, что в инерциальных *системах отсчета* все механические явления протекают одинаково. Другими словами, никакими механическими опытами нельзя установить отличие равномерного прямолинейного движения от покоя. В XX в. А. Эйнштейн распространил принцип относительности Галилея на все явления природы. Именно осознание принципиальной невозможности обнаружить равномерное и прямолинейное движение позволило понять, почему люди на Земле, движущиеся в соответствии с гелиоцентрической системой мира со скоростью 30 км/с вокруг Солнца, не замечают этого движения. Центростремительное ускорение, связанное с обращением Земли вокруг Солнца, чрезвычайно мало по сравнению с ускорением силы тяжести на Земле. Поэтому эффекты, связанные с отличием движения Земли от равномерного и прямолинейного движения, обнаружить очень трудно.

Таким образом, несмотря на относительность траектории механического движения и некоторых других его характеристик, законы физики в различных инерциальных системах отсчета оказываются абсолютными.

Тепловое движение представляет собой беспорядочное движение больших совокупностей частиц — *атомов, молекул, электронов,* ионов, коллоидных частиц. Огромное число частиц, принимающих участие в тепловом движении, определяет качественное отличие законов этого движения от законов, описывающих механическое движение. Тепловое движение описывается законами статистической механики, из которых следует необратимость тепловых явлений, в то время как механические явления обратимы (см. *Статистическая физика*).

Один из разделов физики — *электродинамика* — изучает электромагнитное поле и формы его движения. Так, к примеру, изменения напряженности электрического поля и индукции магнитного поля при распространении электромагнитной волны следует рассматривать как особую форму движения поля (см. *Электромагнитные волны*). В *атомной* и *ядерной физике* рассматриваются такие проявления движения, как *радиоактивность, деление атомных ядер* и их синтез, взаимопревращаемость частиц, превращения вещества в поле и обратные превращения поля в вещество.

ДЕЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

Деление *атомных ядер* — процесс, при котором тяжелое ядро распадается на два (а иногда и больше) легких, называемых осколками.

Чтобы представить себе, как это происходит, воспользуемся капельной моделью ядра, предложенной Н. Бором. Ядерные силы действуют на малых расстояниях ($\sim 10^{-15}$ м), нуклоны (см. *Ядро атомное*) взаимодействуют только со своими соседями, и вещество ядра практически несжимаемо. Частицы, находящиеся на его поверхности, как и молекулы на поверхности жидкости, стремятся уйти вглубь, и этим создают силы *поверхностного натяжения*. Поэтому ядро стремится принять шарообразную форму и напоминает своими свойствами каплю жидкости.

Однако в отличие от обычной капли ядерная — заряжена. С ростом числа *протонов* в ядре силы электрического отталкивания начинают конкурировать с ядерными силами, обеспечивающими его устойчивость. Наступает момент, когда большой капле энергетически выгоднее разделиться на две малые, но выгода еще не означает возможность.

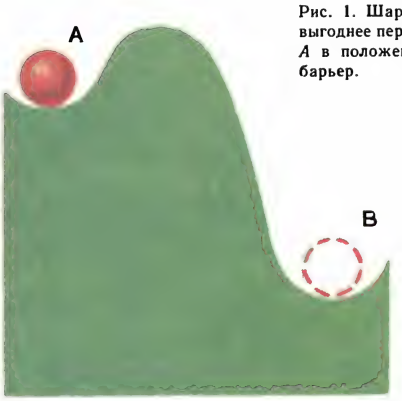


Рис. 1. Шарику энергетически выгоднее перейти из положения *A* в положение *B*, но мешает барьер.

Для того чтобы деление произошло, капля сначала должна деформироваться, вытянуться и, следовательно, увеличить свою поверхность (шар при заданном объеме имеет минимальную поверхность). Это требует первоначальных затрат энергии. Ситуация напоминает изображенную на рис. 1.

Шарику энергетически выгоднее перейти из точки *A* в точку *B*, но для этого необходимо получить откуда-то энергию, чтобы перебраться через этот барьер.

Откуда ядро берет энергию?

От захвата какой-то частицы. Выделяющаяся при этом энергия может оказаться достаточной, чтобы заставить ядро-каплю колебаться, изменить свою форму, вытянуться и, наконец, разорваться (рис. 2).

Второй способ — туннельный переход под барьером (см. *Туннельный эффект*). *Квантовая механика* допускает такой процесс. Его вероятность зависит от высоты и ширины барьера и может быть очень мала. Конечно, капельная модель дает лишь очень приблизительное описание процесса. Созданы более точные (и гораздо менее простые) теории, разработка которых продолжается и в настоящее время.

Осколки уносят значительную (по масштабам микромира) энергию — около 200 МэВ. Кроме того, при делении и потом они излучают *нейтроны*, гамма-кванты, бета-лучи (см. *Гамма-излучение, Бета-распад*). Деление может быть самопроизвольным — спонтанным (туннельный переход) или вызываться нейтронами, заряженными частицами, гамма-квантами.

Чем тяжелее ядро, тем меньше период его спонтанного деления. Ядра с $Z > 120$ должны делиться мгновенно.

Деление урана под действием нейтронов было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом. Спонтанное деление урана открыли в 1940 г. советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак.

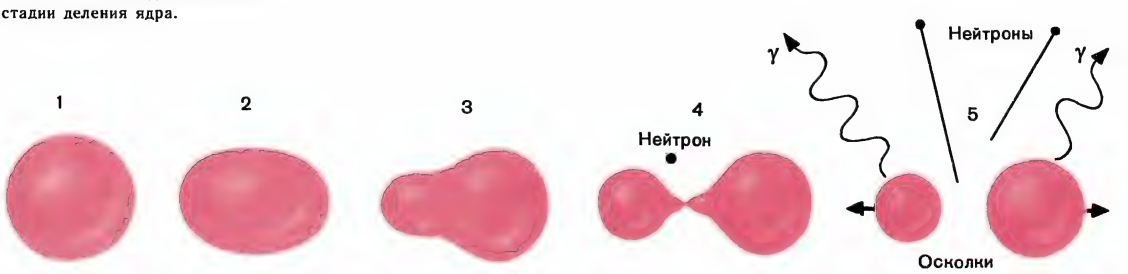
Открытие деления ядер позволило человечеству получить новый источник энергии (см. *Ядерная энергетика*).

ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Французский физик А. Беккерель открыл *радиоактивность*, заметив, что соли урана засвечивают фотопластинку. Он обнаружил, что излучение этих солей вызывает свечение люминофоров и разряжает электроскоп (см. *Люминесценция*).

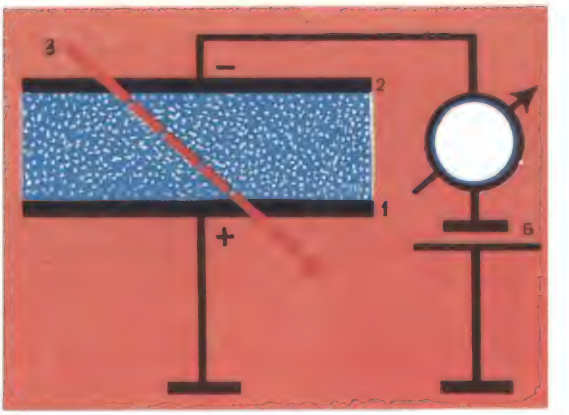
В дальнейшем способы регистрации ядерных излучений были значительно усовер-

Рис. 2. Последовательные стадии деления ядра.



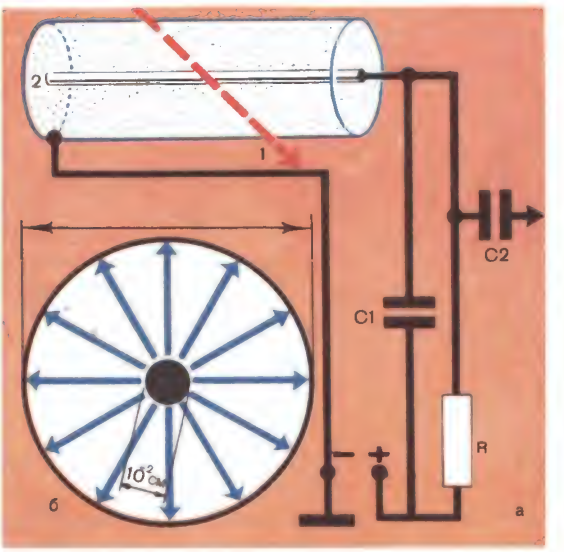
шенствованы и стали основой приборов, измеряющих ядерные излучения. Так, гораздо надежнее электроскопа ионизационная камера (рис. 1). *Электроны* или *альфа-частицы* в рабочем объеме камеры, заполненном газом, оставляют след из ионов и электронов — в цепи возникает ток. По его величине можно судить о потоке частиц, проходящих через объем камеры. Так работает дозиметр — прибор для определения дозы радиоактивного облучения на рабочем месте. В импульсной ионизационной камере можно измерить заряд ионов, образующийся при прохождении одной частицы, а по заряду определить и ее энергию.

Рис. 1. Ионизационная камера *1, 2* — электроды; *3* — трек частицы.



Газоразрядные счетчики Гейгера — Мюллера (названные по имени немецких физиков Х. Гейгера и В. Мюллера) напоминают ионизационную камеру (рис. 2). Но принцип их работы совсем иной. У нити-анода силовые линии электрического поля сгущаются. Электрическое поле сильно ускоряет пришедшие сюда электроны, и они сами начинают ионизировать газ, которым наполнена камера, например аргон. Возникает лавина электронов, и в конечном итоге на каждый первичный электрон рождаются тысячи. Величина импульса счетчика Гейгера — Мюллера получается большой по сравнению с импульсом в ионизационной камере, но зато он не определяет энергию частицы. Такой счетчик регистрирует только сам факт прихода импульса.

Рис. 2. Счетчик Гейгера — Мюллера. *1* — корпус; *2* — нить; C_1, C_2 — конденсаторы; R — резистор.



Полупроводниковые детекторы иногда называют твердотельными ионизационными камерами (рис. 3) (см. *Полупроводники*). Энергия, идущая на образование пары ионов в полупроводниковом материале — кремнии или германии, примерно на порядок меньше, чем в газе: 3 и 30 эВ — характерные значения. Поэтому по точности измерений полупроводниковые детекторы превосходят счетчики других типов.

Свечение люминофоров, замеченное А. Беккерелем, использовалось английским ученым Э. Резерфордом для визуальной регистрации α-частиц с помощью экрана из сернистого цинка. В современном люминесцентном счетчике роль экрана играет либо кристалл NaI, либо жидкость — люминофор, а роль наблюдателя — фотоумножитель и электронная аппаратура. Частица возбуждает атомы кри-

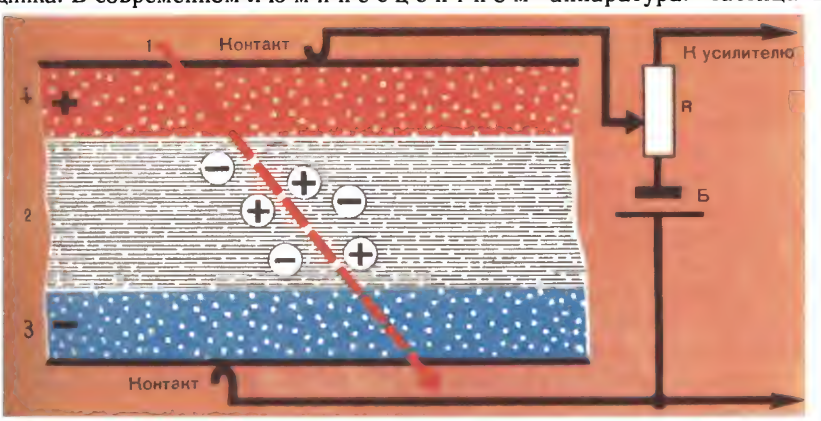


Рис. 3. Полупроводниковый счетчик с p — n-переходом. *1* — траектория заряженной частицы; *2* — область p — n-перехода; *3* — p-слой; *4* — n-слой.

Рис. 4. Схема камеры Вильсона.

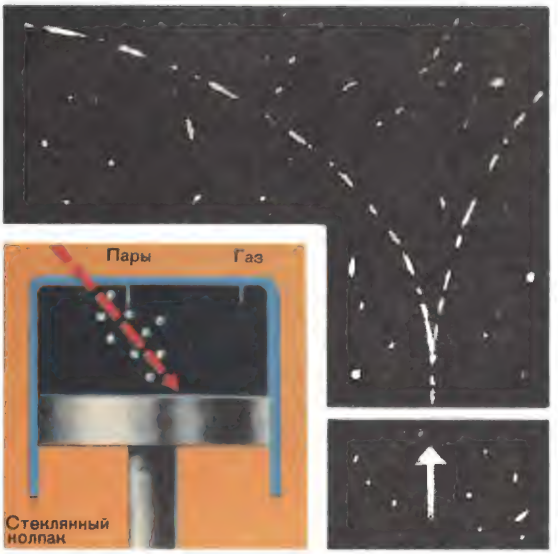
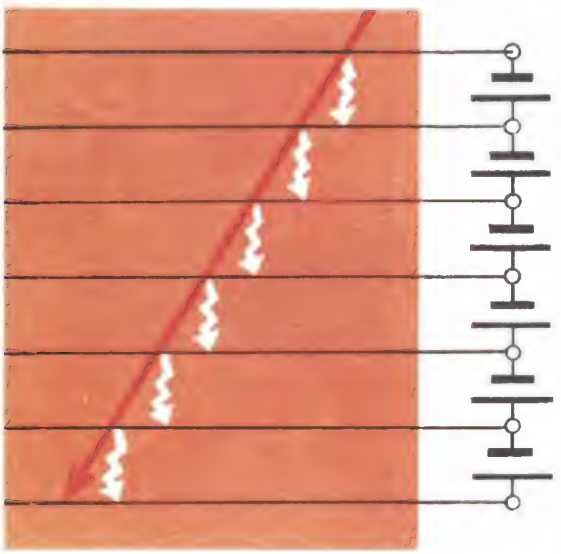


Рис. 5. Схема искровой камеры.



сталла, они испускают фотоны, и фотоумножитель регистрирует свет. Когда необходим детектор большого объема, люминесцентный — сцинтилляционный счетчик незаменим. Для регистрации *нейтрино* американские ученые Ф. Райнес и К. Коуэн создали целое сооружение: их «счетчик» содержал 5000 л жидкого сцинтиллятора (люминофора)!

Со времени Беккереля для регистрации ядерных частиц применяются фотопластинки, в которых после проявления можно наблюдать траектории частиц по их следам — трекам. Камера Вильсона — трековый детектор. В ней ионы, образовавшиеся вдоль пути заряженной частицы, служат центрами конденсации капелек паров жидкости. Трек из этих капелек фотографируется на фотопленку (рис. 4). Для регистрации частиц высокой энергии применяют пузырьковые камеры. В них частица образует след из пузырьков. В такой камере укладываются траектории очень быстрых частиц: пробег в жидкости энергичной частицы меньше, чем в газе. Кроме того, пузырьковая камера может быть сделана очень большого объема. Полные сведения о траектории частицы получают с помощью искровой камеры (рис. 5).

На *эффекте Вавилова — Черенкова* основан принцип действия черенковского счетчика. В таком счетчике скорость частицы определяют по характеру свечения прозрачного тела, сквозь которое она проходит. С помощью счетчиков Черенкова был открыт антипротон.

Нейтральные частицы — γ-кванты (см. *Гамма-излучение*), *нейтроны,* мезоны, *нейтрино* регистрируют по рождаемым ими в веществе заряженным частицам. Так, чтобы измерить поток медленных нейтронов, ионизационную камеру или газовый счетчик заполняют гелием ^{3}He. После захвата *нейтрона* образуются *протон* и *тритон:* $^3\mathrm{He} + {}^1n \rightarrow p + {}^3_1\mathrm{H}$; по производимой этими частицами (в основном протоном) ионизации и регистрируют появление в счетчике теплового нейтрона. Если стенки ионизационной камеры покрыть ураном, то осколки деления урана нейтронами будут ионизировать газ и тем самым свидетельствовать о прохождении через объем камеры нейтронного потока.

Современный эксперимент характеризуется сложной логикой регистрации частиц. Детекторы подключаются к усилителям импульсов, схемам совпадений, схемам временной задержки. Электрические импульсы, порожденные заряженными частицами, после предварительного усиления и формирования попадают на амплитудные анализаторы — приборы, сортирующие импульсы в зависимости от энергии частиц. Результаты измерений непосредственно во время эксперимента поступают на ЭВМ для непрерывной обработки. В наши дни только с применением сложных технических средств удается проникать в тайны ядерного микромира (см. *Элементарные частицы*).

ДЖОЗЕФСОНА ЭФФЕКТ

Представим себе, что два куска сверхпроводника (см. *Сверхпроводимость*) разделены тонкой пленкой *диэлектрика.* Могут ли *электроны* переходить из одного сверхпроводника

Рис. 1. Туннелирование сверхпроводящих пар.

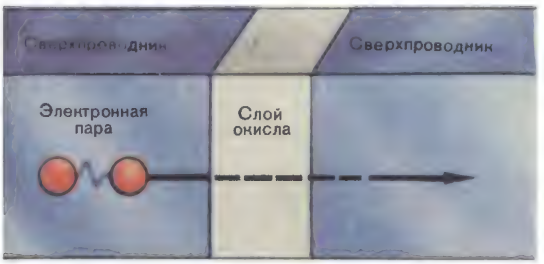


Рис. 2. Элемент Джозефсона.

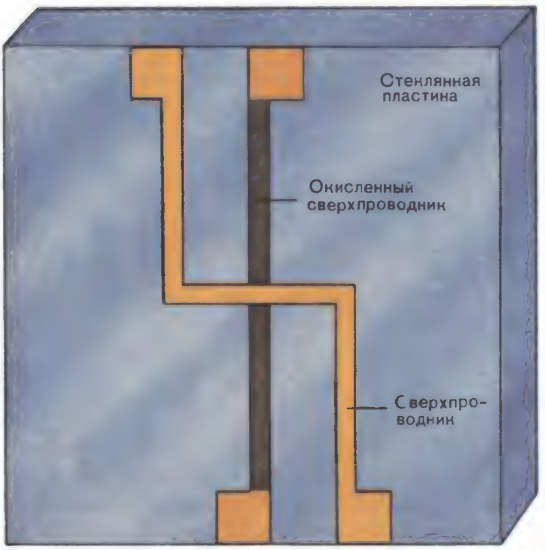


Рис. 3. Распределение тока в контакте зависит от внешнего магнитного поля.

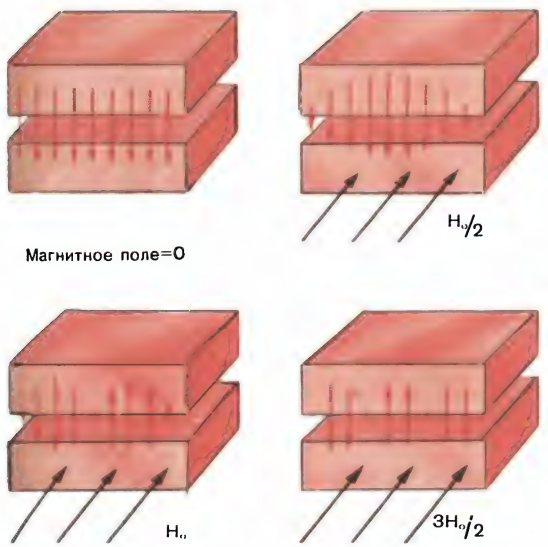
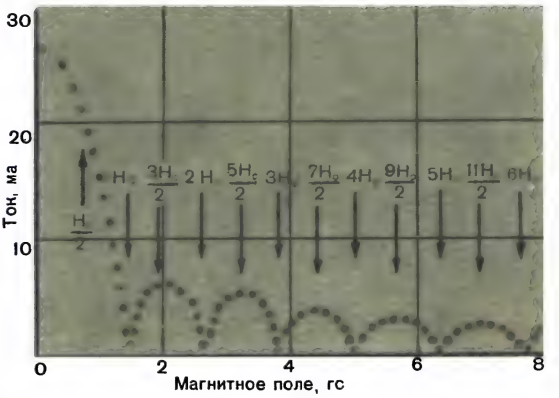


Рис. 4. Экспериментальная зависимость тока от индукции магнитного поля.



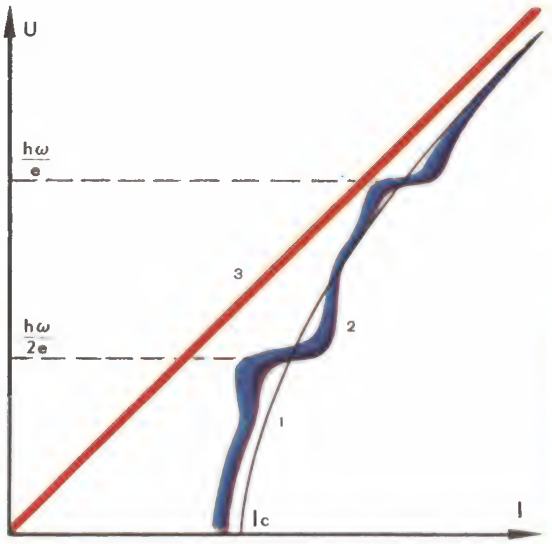
в другой? Да, это происходит вследствие *туннельного эффекта*. Точно так же и куперовские пары электронов туннелируют сквозь слой диэлектрика, перенося сверхпроводящий ток (рис. 1). Именно это явление было предсказано в 1962 г. английским физиком-теоретиком Б. Джозефсоном.

Экспериментально эффект Джозефсона впервые обнаружили в 1963 г. американские физики П. Андерсон и Дж. Роуэлл. На рис. 2 изображен джозефсоновский элемент (так называют структуру сверхпроводник — диэлектрик — сверхпроводник). Видны оловянные полоски пленки, которые нанесены на стеклянную пластинку и крестообразно пересекаются. В месте пересечения они разделены слоем окисла олова толщиной ~ 10 Å. Для подвода тока используются либо верхние, либо нижние электроды.

Американские ученые не только установили возможность протекания сверхпроводящего тока в такой системе. Им удалось доказать, что этот ток в соответствии с теоретическими предсказаниями обладает уникальной зависимостью от внешнего магнитного поля. На рис. 3 показано, как меняется распределение тока в контакте при увеличении внешнего поля. Видно, что если размер контакта точно равен пространственному периоду изменения плотности тока (поле H_0), то общий ток Джозефсона обращается в нуль. Экспериментальная кривая зависимости тока от индукции магнитного поля изображена на рис. 4. Высокая чувствительность контакта Джозефсона к магнитному полю очень скоро нашла свое практическое применение (см. *Сверхпроводимость*).

Еще более впечатляющим оказалось предсказанное Джозефсоном поведение контакта сверхпроводник — диэлектрик — сверхпроводник при подключении его к источнику постоянного напряжения U. Электроны при туннелировании ускоряются в электрическом поле (оно сосредоточено в слое диэлектрика) так же,

Рис. 5. Вольт-амперная характеристика контакта без облучения (*1*) и во внешнем электромагнитном поле с частотой ω (*2*). Прямая (*3*) соответствует нормальному состоянию контакта (закон Ома).



как и электроны в обычном туннельном контакте, и пары электронов приобретают дополнительную энергию $2eU$ (см. *Туннельный эффект*). Избавиться от этой «лишней» энергии в сверхпроводнике, где нет тепловых потерь, можно, только излучив квант энергии. Частота кванта ω связана с напряжением U соотношением: $h\omega = 2eU$. Значит, джозефсоновский элемент может служить источником электромагнитного излучения.

Такое излучение впервые было обнаружено в 1965 г. группой советских ученых в Харьковском физико-техническом институте.

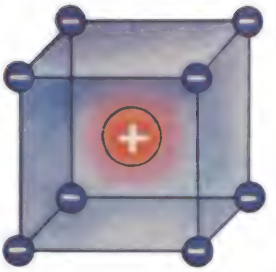
Джозефсоновские элементы могут также служить чувствительными детекторами внешнего излучения, которое приводит к появлению характерных особенностей (ступенек) на их вольт-амперных характеристиках (рис. 5).

В последнее время большой интерес проявляется к исследованиям по созданию сверхпроводящих ЭВМ с джозефсоновскими элементами памяти. Созданы приемники, усилители, преобразователи частоты на основе эффекта Джозефсона, обладающие рекордными характеристиками. Область применения этого удивительного эффекта в криоэлектронике (так называют область электроники, использующую *низкие температуры*) все время расширяется.

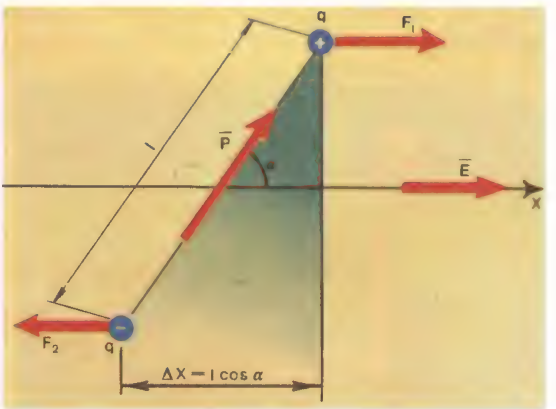
ДИПОЛЬ

У *атомов* и *молекул* в нормальном состоянии сумма положительных и отрицательных зарядов равна нулю. Такие объекты называют электрически нейтральными, и их большинство

Система зарядов с дипольным моментом $\bar{p} = 0$; в центре куба заряд $+4q$, а в вершинах — заряды $-q$.



Электрический диполь с дипольным моментом $\bar{p} = ql$ во внешнем электрическом поле E



в природе. Но и атом, и молекула, да и любое тело содержат в себе электрические заряды, и эти заряды создают электрическое поле. Простейшая нейтральная система из двух разноименных зарядов, расположенных на расстоянии l, называется электрическим *диполем* и характеризуется вектором — дипольным моментом $\bar{p} = ql$ (см. рис.). Вектор направлен от отрицательного к положительному заряду. Под действием внешнего электрического поля $\bar{E}$ диполь стремится повернуться вдоль поля.

Собственное электрическое поле диполя $\bar{E}_д$ — векторная сумма полей точечных зарядов $\bar{E}_+$ и $\bar{E}_-$. Эта величина в точке $\bar{r}$ может быть выражена через вектор $\bar{p}$ и единичный вектор $\bar{n} = \frac{\bar{r}}{r}$. Вдоль линии, проходящей через заряды, поле $\bar{E} = \frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\,\bar{n}$ (ε_0 — электрическая постоянная). Получается, что поле $\bar{E}_д$ убывает быстрее, чем поле точечного заряда. Поэтому на вопрос, нейтральна или нет данная система зарядов, можно ответить, измерив ее электрическое поле на расстояниях, значительно превышающих ее размеры. Электрическое поле нейтральной системы убывает быстрее, чем $1/r^2$, а системы, у которой дипольный момент равен нулю, быстрее, чем $1/r^3$. Нейтральную систему зарядов во многих задачах удобно рассматривать как диполь с моментом $\bar{P}$, равным сумме моментов, входящих в систему диполей.

Рис. 1. Краевая дислокация. Рисунок с фотографии, сделанной на электронном микроскопе. Стрелкой показана лишняя плоскость.

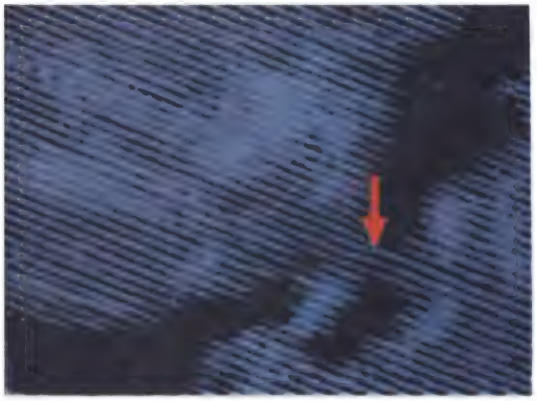
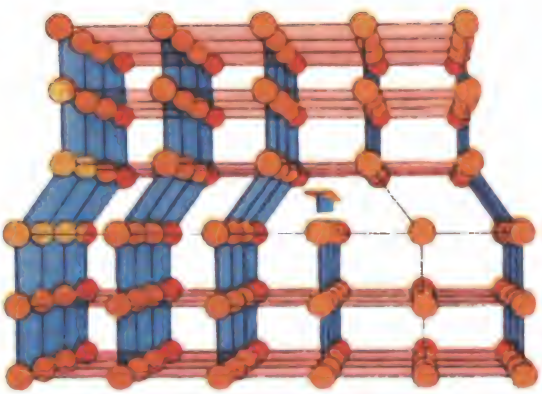


Рис. 2. Модель краевой дислокации.



ДИСЛОКАЦИИ

Если приглядеться к фотографии кристалла, полученной на электронном микроскопе (рис. 1), то можно увидеть, что периодическое расположение атомов в некоторых местах нарушается. Атомные плоскости следуют одна за другой (на фотографии видны атомные ряды — края этих плоскостей), но вот появляется «лишняя» плоскость, и идеальной кристаллической структуры уже нет.

Наглядное представление о характере искажений кристаллической решетки, которые при этом возникают, дает рис. 2. Видно, что нарушение правильности структуры сосредоточено вблизи одной линии. Можно сказать, что дефект решетки вызван кристаллической полуплоскостью, вдвинутой между правильными плоскостями. Такой дефект кристалла называют краевой дислокацией (обычно его отмечают значком ⊥), а край полуплоскости — линией дислокации.

Другой тип дефекта в кристаллической решетке — винтовая дислокация. Представление о характере искажений, происходя-

ЯКОВ ИЛЬИЧ ФРЕНКЕЛЬ (1894 — 1952)

Советский физик-теоретик, член-корреспондент Академии наук СССР.

Родился в Ростове-на-Дону. После окончания в 1916 г. Петроградского университета был оставлен в университете для подготовки к профессорскому званию. В 1921 г. возглавил теоретический отдел Физико-технического института и кафедру теоретической физики Ленинградского политехнического института.

Область научных интересов Я. И. Френкеля была необычайно широка: физика атомного ядра, электронная теория твердых тел, астрофизика, геофизика, биофизика, электродинамика, квантовая механика, идеи которой он использовал в своей электронной теории металлов. Френкелю принадлежат основополагающие работы по квантовой теории *твердого тела*.

Исследуя механизм поглощения света кристаллами, Френкель ввел представление об экситонах — *квазичастицах*, которые переносят световое возбуждение по кристаллу.

При изучении кристаллов Френкель ввел представление о дефектах кристаллической решетки, разработал теорию подвижных *дислокаций*.

В 1939 г. Я. И. Френкель (одновременно с Н. Бором) разработал так называемую капельную модель *атомного ядра*, использованную для теоретического объяснения деления ядер.

Я. И. Френкель заложил основы современной теории ферромагнетизма (см. *Магнетизм*).

Большой вклад ученый внес в *кинетическую теорию жидкостей* (Государственная премия СССР, 1947). Он показал, что жидкостям присущи элементы твердости, развил молекулярную теорию текучести твердых тел, изучал явления *диффузии* и *вязкости*.

В 1946 г. он объяснил явление спекания металлических порошков, подготовив теоретические основы порошковой металлургии.

Я. И. Френкель — автор первого в нашей стране полного курса *теоретической физики*.

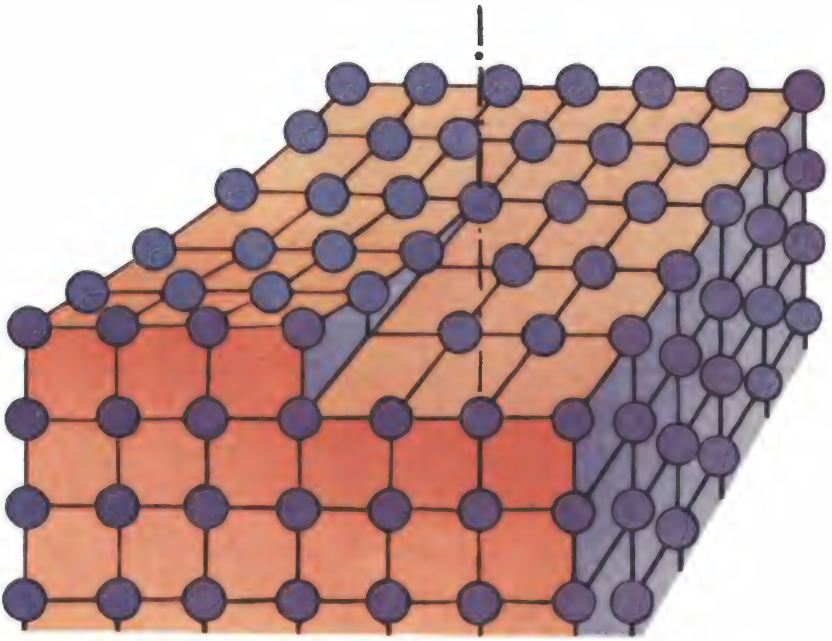


Рис. 3. Модель винтовой дислокации.

щих в этом случае, дает рис. 3. Нарушения периодичности опять сосредоточены вблизи одной линии (на рис. 3 она показана пунктиром). Эта линия — ось винта, состоящего из атомных плоскостей. Как видно, она перпендикулярна нарушенным плоскостям, в то время как линия краевой дислокации параллельна лишней плоскости.

В общем случае *дислокации* как дефекты кристаллической решетки представляют собой некоторые линии. Эти линии не обязательно прямые (как в случае краевых и винтовых дислокаций), а могут как угодно изгибаться. Но они должны быть замкнутыми линиями или оканчиваться на поверхности кристалла.

Число дислокационных линий, пересекающих единичную площадку, проведенную внутри тела, называют плотностью дислокаций. Дислокаций много ($\sim 10^6 - 10^7$ м$^{-2}$) даже в совершенных монокристаллах. В сильнодеформированных кристаллах, особенно в металлах, плотность дислокаций достигает $10^{15} - 10^{16}$ м$^{-2}$.

Самый распространенный способ определения плотности дислокаций — травление поверхности специальными составами. Поверхность легче травится в местах нарушенной структуры, и выходы дислокационных линий на поверхность видны как ямки травления.

Дислокации сравнительно легко перемеща-

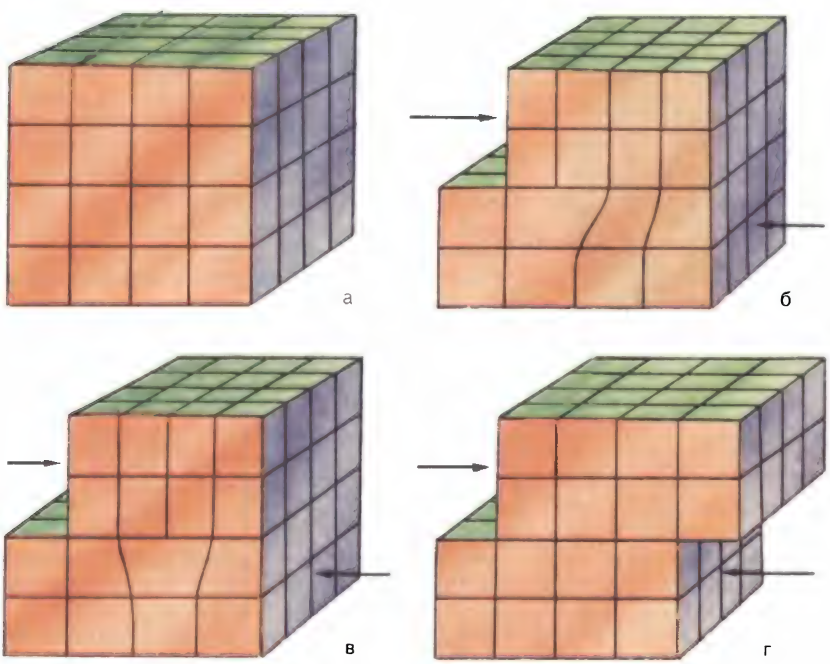
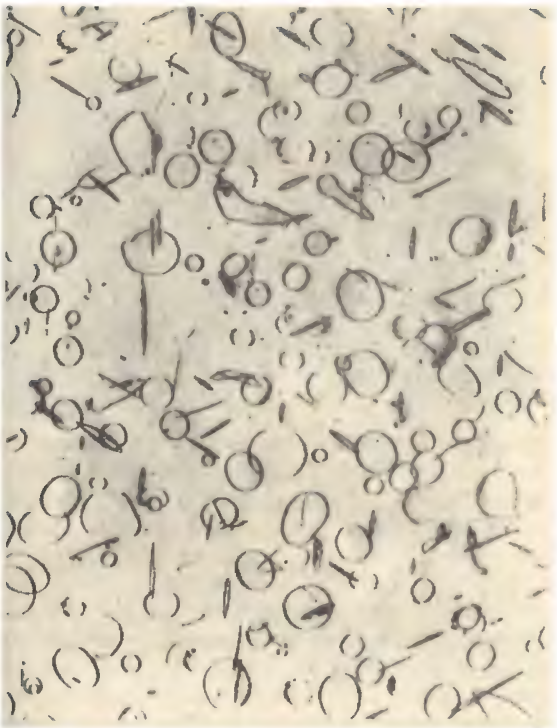


Рис. 4. Пластическая деформация кристалла (*а — г*).

Дислокационная структура кристалла германия (микрофотография).



ются внутри кристалла под действием внешней силы. Перемещение краевой дислокации показано на рис. 4. Видно, что при этом происходит сдвиг атомных плоскостей — пластическая деформация кристалла. Таким образом, пластичность *твердого тела* связана с наличием в нем дислокаций и возможностью их движения.

В чистых монокристаллах при их нагружении дислокации перемещаются сравнительно легко. А вот если имеются другие дислокации, примеси или границы кристаллических зерен, то дислокации тормозятся и прочность материала повышается. Так, прочность чистого железа при растворении в нем углерода значительно возрастает, и это важный фактор при получении различных сортов сталей.

С другой стороны, совершенно идеальные кристаллы без дислокаций обладают максимальной прочностью, так как при пластической деформации необходимо в таком случае сдвигать друг относительно друга целые атомные плоскости, а для этого нужна огромная энергия.

Дислокации играют важную роль в процессе роста кристаллов. При росте кристалла каждому следующему атому необходимо выбрать правильное место в кристаллической решетке. Если атомный слой еще не заполнен целиком, то атом «садится» в угол вблизи соседей. Ну, а куда пристроиться атому, когда начинает образовываться следующий слой? Если в кристалле есть, например, винтовая дислокация, то атом «предпочитает» расположиться вблизи ее линии, и отсюда начинается рост следующего слоя. В результате вырастает кристалл с встроенной внутри него винтовой дислокацией. Этим способом можно получать почти идеальные кристаллы (так называемые «усы»), содержащие только одну винтовую дислокацию.

Прочность таких кристаллов примерно в 1000 раз больше, чем у массивных образцов, что близко к теоретическому пределу для идеальных кристаллов. Но к сожалению, «усы» имеют обычно толщину всего в несколько микрометров, а способы выращивания больших идеальных кристаллов пока только разрабатываются.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

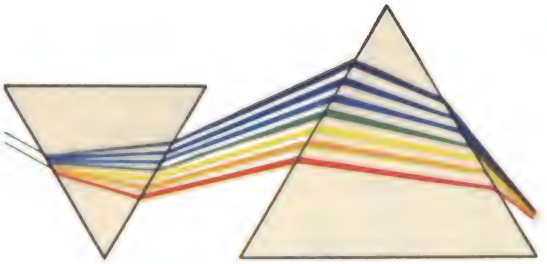
В 1665—1667 гг. в Англии свирепствовала эпидемия чумы, и молодой Исаак Ньютон решил укрыться от нее в своем родном Вулсторпе. Перед отъездом в деревню он приобрел стеклянные призмы, чтобы «произвести опыты со знаменитыми явлениями цветов».

Уже в I в. н. э. было известно, что при прохождении через прозрачный монокристалл с формой шестиугольной призмы солнечный свет разлагается в цветную полоску — с п е к т р. Еще раньше, в IV в. до н. э., древнегреческий ученый Аристотель выдвинул свою теорию цветов. Он полагал, что основным является солнечный (белый) свет, а все остальные цвета получаются из него добавлением к нему различного количества темного цвета. Таким образом, по этой теории выходило, что цвета радуги сложные, а солнечный свет простой. Несмотря на создание стеклянных призм и опыты по разложению солнечного света, проводимые с их помощью различными естествоиспытателями, в науке вплоть до XVII в. продолжало господствовать учение Аристотеля о цвете.

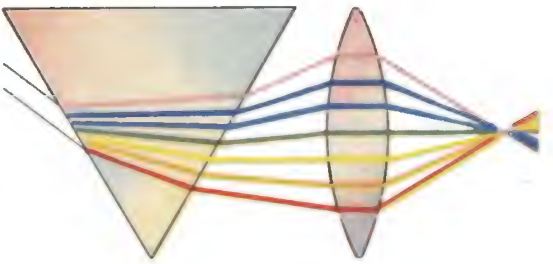
Исследуя природу цветов, Ньютон придумал и выполнил целый комплекс различных оптических экспериментов. Замечательно, что некоторые из них пережили столетия, и их методика без существенных изменений используется в физических лабораториях до сих пор. Рассмотрим некоторые из них.

Первый опыт был традиционным. Проделав небольшое отверстие в ставне окна затемненной комнаты, Ньютон поставил на пути пучка лучей, проходивших через это отверстие, стеклянную призму. На противоположной стене он получил изображение в виде полоски чередующихся цветов. Полученный таким образом спектр солнечного света Ньютон разделил на семь цветов р а д у г и — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Установление именно семи основных цветов спектра в известной степени произвольно: Нью-

Разложение белого света с помощью призмы.



Синтез белого света с помощью призмы.



тон стремился провести аналогию между спектром солнечного света и музыкальным звукорядом. Если же рассматривать спектр без подобного предубеждения, то полоса спектра, скорее, распадается на три главные части — красную, желто-зеленую и сине-фиолетовую. Остальные цвета занимают сравнительно узкие области между этими основными. Вообще же человеческий глаз может различить в спектре солнечного света до 160 различных цветовых оттенков.

В последующих опытах Ньютону удалось соединить цветные лучи в белый свет. Для этого он пропустил лучи солнечного света сквозь призму (см. рис.), а затем вышедшие из нее цветовые лучи собрал с помощью собирающей линзы. Оказалось, что в месте соединения цветовых лучей, действительно, луч стал белого цвета. По прохождению этой точки цветовые лучи снова расходятся и располагаются в порядке, обратном обычному спектру.

В результате своих исследований Ньютон, в противоположность Аристотелю, пришел к убеждению, что при смешении «белизны и черноты никакого цвета не возникает...» Все цвета спектра содержатся в самом солнечном свете, а стеклянная призма лишь разделяет их, так как различные цвета по-разному преломляются стеклом. Таким образом, Ньютон внёс поправку к известному ранее закону преломления света: показатели преломления на самом деле постоянны для двух заданных сред при любых углах падения, но они меняются при изменении цвета падающего луча. Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, слабее всего — красные. Впоследствии ученые установили тот факт, что, рассматривая свет как *волну*, каждому цвету следует сопоставлять свою длину волны. Очень важно, что эти длины волн меняются непрерывным образом, соответствуя различным оттенкам каждого цвета.

Изменение показателя преломления среды в зависимости от длины распространяющейся в ней волны и называется *дисперсией* (от латинского глагола «рассеивать»). Для обычного стекла показатель преломления близок к 1,5 для всех длин волн видимого света. При этом его дисперсия такова, что при переходе от красного ($\lambda \simeq 0{,}65$ мкм) к фиолетовому ($\lambda \simeq 0{,}44$ мкм) цвету коэффициент преломления увеличивается от 1,514 до 1,534, т. е. всего на 1,3%.

Тем не менее этот один процент позволил ученым с помощью специальных приборов — спектрографов — получать важнейшую информацию о составе и свойствах различных веществ, изучая их спектры излучения и поглощения.

Опыты Ньютона и других ученых показывали, что с увеличением длины волны света показатель преломления исследуемых веществ монотонно уменьшается. Однако в 1860 г., измеряя показатель преломления паров иода, французский физик Леру обнаружил, что красные лучи преломляются этим веществом сильнее, чем синие. Это явление он назвал аномальной дисперсией света; в дальнейшем оно было обнаружено и во многих других веществах. В современной физике как нормальная, так и аномальная дисперсия света объясняются единым образом. Отличие этих двух явлений друг от друга заключается в том, что нормальная дисперсия происходит с лучами света, длина волны которых далека от области поглощения излучения данным веществом, а аномальная дисперсия наблюдается именно в области поглощения.

ДИФРАКЦИЯ

Если на пути светового луча поставить экран, то за ним возникает область тени. А вот от звука отгородиться не так-то просто — слышать можно и из-за угла. Проникновение волны в область геометрической тени называют *дифракцией*. Дифракция проявляется, когда длина волны сравнима с размером препятствия. Звуковые волны имеют длину порядка метров и легко огибают края препятствия. Точно так же можно наблюдать дифракцию волн на поверхности воды. А дифракцию света, имеющего длину волны порядка долей микрометров, в обычных условиях заметить трудно. Долгое время даже считали, что световые лучи всегда распространяются прямолинейно.

Рис 1 Дифракция света на шурупе.

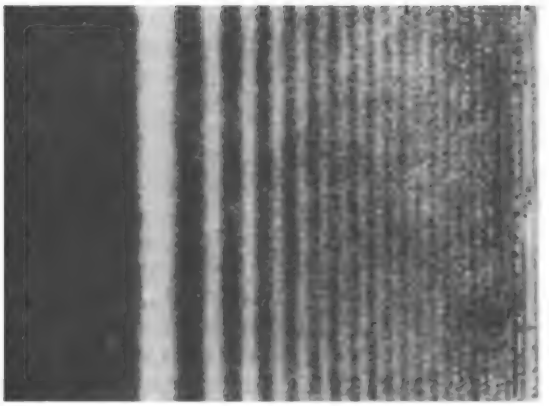
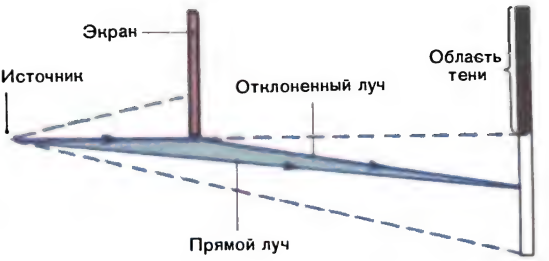


Рис. 2. Схема опыта по дифракции света на краю экрана и наблюдаемая дифракционная картина.



В 1815 г. французский инженер О. Френель за участие в военных действиях против Наполеона после его возвращения с острова Эльба, в период Ста дней, был уволен с работы и вынужден удалиться в местечко Матье, где занялся оптическими исследованиями. Он знал об опытах английского физика Т. Юнга по *интерференции* света и хотел повторить его опыты. Но ему удалось сделать гораздо больше. Уже в 1818 г. Френель представил обширный мемуар по дифракции на конкурс Французской академии наук.

Этот мемуар рассматривала комиссия, в которую входил маститый ученый Пуассон. Теория Френеля обладала математической строгостью и красотой, но, основываясь на ней, Пуассон получил парадокс. Сделав соответствующие расчеты, он показал, что при определенном размере и положении шарика между источником света и экраном на экране за шариком вместо геометрической тени получается светлое пятно. Пуассон написал об этом Френелю как о доказательстве несостоятельности его теории. И Френель сам проделал этот опыт. Результат получился неожиданным — действительно, за шариком на экране можно было увидеть светлое пятно. Данный опыт по дифракции света стал началом широкого признания волновой природы света.

В наше время научились наблюдать дифракцию не только световых волн (рис. 1), но и более коротких *рентгеновских лучей*. Длина волны рентгеновского излучения сравнима с межатомными расстояниями. Поэтому если на кристалл направить рентгеновские лучи, то они будут отклоняться и возникнет дифракционная картина — л а у э г р а м м а (от имени Макса фон Лауэ, впервые в 1912 г. открывшего дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах).

Лауэграмма состоит из пятен разной интенсивности, расположенных регулярным образом вокруг центрального пятна. Ученые научились расшифровывать лауэграммы и с их помощью выяснили геометрическую структуру кристаллов (см. *Кристаллофизика*).

Если направить на край экрана монохроматический свет, то образуется дифракционная картина (рис. 2). Вследствие интерференции прямых и отклоненных лучей вблизи границы области геометрической тени возникает система чередующихся темных и светлых полос (максимумов и минимумов освещенности).

Аналогичная картина наблюдается и при дифракции света на узкой щели. Кроме центрального максимума в направлении первоначального распространения волны возникают боковые максимумы освещенности, создаваемые отклоненными лучами. Положение боковых максимумов зависит от длины волны. Поэтому когда на щель падает белый свет, то на экране за щелью он расщепляется в спектр. Дифракцию света используют для создания чувствительных спектральных приборов.

Оказывается, что если вместо одной щели использовать систему параллельных щелей (д и ф р а к ц и о н н а я р е ш е т к а), то разрешающая способность прибора заметно увеличивается (разница в отклонении лучей с разными длинами волн возрастает). Дифракционные решетки делают, например, нанося частые параллельные риски на стеклянную пластину. Число штрихов на один миллиметр зачастую достигает нескольких сотен, а расстояние между ними выдерживается с большой точностью.

Дифракционные явления приносят не только пользу, но и вред, ограничивая разрешающую способность *оптических приборов*. Пучок света из-за дифракции никогда не удается собрать в точку, и поэтому изображение предмета даже в идеальной оптической системе выходит расплывчатым. Так, в телескопе изображение далекой звезды получается в виде пятна с минимальным размером $\sim (\lambda/D)$, где λ — длина волны света, а D — диаметр линзы объектива. Чтобы увеличить разрешение, приходится делать телескопы большого диаметра. Точно так же дифракция мешает разглядеть сколь угодно малые детали предмета в микроскопе. Для увеличения разрешения здесь надо уменьшать длину волны. Наибольшее разрешение имеет электронный микроскоп, который позволяет увидеть даже отдельные атомы.

ДИФФУЗИЯ

Диффузия — это самопроизвольное выравнивание неоднородной концентрации *атомов* или *молекул* разного сорта. Если в сосуд впустить порции различных *газов*, то через некоторое время все газы равномерно перемешаются: число молекул каждого сорта в единице объема сосуда станет постоянным, концентрация выравняется. Если воду и чернила осторожно налить в тонкую — во избежание конвекции — пробирку, в капилляр, то четкая вначале поверхность раздела начнет расплываться, и в конце концов жидкости перемешаются. Перемешиваются и атомы *твердых тел*, если тела растворяются друг в друге. Только процесс этот гораздо более медленный, и поэтому диффузию в твердых телах впервые наблюдали только в конце прошлого века.

Взаимное перемешивание есть следствие беспорядочных блужданий атомов или молекул (или других частиц). Оно реализуется благодаря тепловому движению частиц.

Движения частиц при диффузии совершенно случайны: протяженность очередного смещения частицы произвольна, все направления смещения равновероятны.

Ясно, что при хаотическом движении предсказать смещение отдельной частицы за время t нельзя: одни частицы почти не сдвинутся с места, другие уйдут довольно далеко. Речь может идти только о смещении, усредненном по всем частицам. Эта задача была впервые решена А. Эйнштейном в 1905 г. применительно к *броуновскому движению* частиц и на год позже польским физиком М. Смолуховским. Оказалось, что диффузионный путь, т. е. смещение из исходного положения при диффузии, пропорционален корню квадратному из времени диффузии: $x_{\text{дифф}} \pm \sqrt{2Dt}$, где D — коэффициент диффузии.

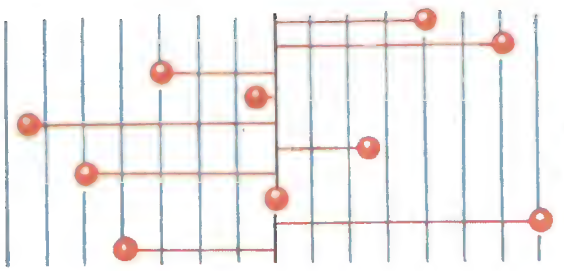
Возникающий при диффузии перенос вещества и приводит к самопроизвольному выравниванию концентрации различных веществ. Атомы (или молекулы) сорта A перемещаются туда, где их меньше и где больше атомов сорта B, и наоборот. В результате происходит диффузионное перемешивание в газах, жидкостях и твердых телах.

Разница концентрации является движущей силой диффузии. Если концентрация всюду одинакова, диффузионный перенос вещества отсутствует. Частицы двигаются, блуждают, но перемешивания не происходит. Примером могут служить блуждания атомов газа, состоящего из частиц одного сорта, т. е. среди себе подобных. Такой процесс называется самодиффузией. Изучать самодиффузию можно только с помощью радиоактивных изотопов. *Изотопами* называются *атомы* одного и того же элемента с различной *массой*, но одинаковым зарядом *атомного ядра*. Атомы радиоактивного изотопа ничем не отличаются от нерадиоактивных атомов того же элемента в химическом смысле, но испускают радиоактивное излучение и позволяют следить за собой (см. *Радиоактивность*). Самодиффузия — это выравнивание неоднородности изотопного состава.

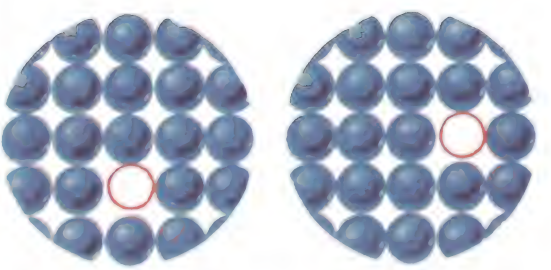
Конечно, выравнивание концентрации в результате диффузии происходит только в отсутствие внешних сил. Если разница концентраций существует наряду с разницей температур, в электрическом поле или в условиях, когда существенна сила тяжести (при большой разнице высот), выравнивание концентрации необязательно. Примером может служить уменьшение плотности воздуха с высотой.

Коэффициент диффузии D характеризует интенсивность теплового движения, приводящего к диффузионному перемешиванию. Порядок величины коэффициентов диффузии в газах 10^{-5} м^2/с, в жидкостях — 10^{-9} м^2/с, причем и те и другие слабо растут с *температурой*. В отличие от них коэффициенты диффузии в твердых телах экспоненционально (по формуле $y = e^x$) растут с ростом температуры. Вблизи температуры плавления $T_{\text{пл}}$ коэффициенты самодиффузии всех твердых *металлов* приблизительно одинаковы и составляют по порядку величины 10^{-12} м^2/с. Так как диффузионный путь близок к $\sqrt{2Dt}$, то при $D = 10^{-12}$ м^{2}с он равен около 0,3 мкм за сутки.

Частицы, начавшие двигаться одновременно от некоторой прямой, сместились на разные расстояния. Легко, однако, заметить, что среднее смещение равно нулю.



Атомы перемещаются по кристаллу, меняясь местами с пустыми узлами — вакансиями.



При понижении температуры коэффициенты самодиффузии разных металлов остаются приблизительно одинаковыми при одинаковых $T/T_{пл}$; это отношение называют сходственной температурой. При $T/T_{пл.} \approx 0{,}5$, $D \approx 10^{-19}$ м^2/с и диффузионный путь менее 0,1 мкм в сутки.

Таким образом, диффузия в твердых телах протекает намного медленнее, чем в жидкостях и газах. Дело в том, что в *газах* и *жидкостях* основной вид теплового движения частиц приводит к их перемешиванию, а в *твердых телах*, в кристаллах, где атомы совершают малые колебания около положения равновесия узла решетки, нет.

Диффузионные процессы чрезвычайно важны на всех стадиях получения и обработки материалов, особенно в твердом состоянии. Диффузия происходит в чистых металлах и металлических сплавах, оксидах и карбидах, *диэлектриках* и *полупроводниках,* в широком диапазоне температур и внешних условий. Именно диффузия в твердых телах обеспечивает соединение металлов при сварке, пайке, хромировании, никелировании, при спекании порошков, позволяет повысить твердость металлов, их прочность и жаропрочность.

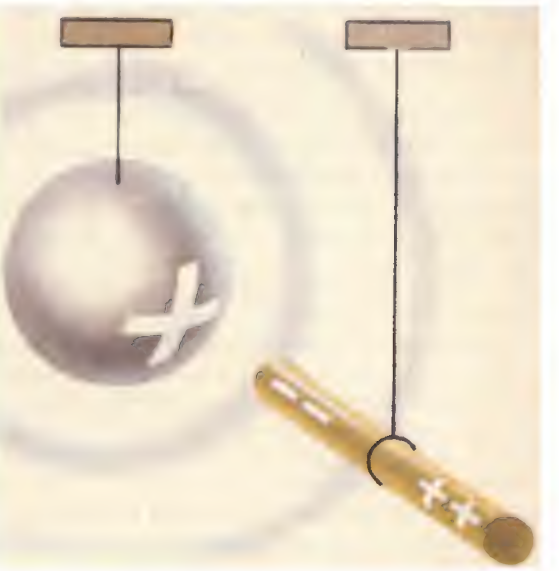
ДИЭЛЕКТРИКИ

Если подвесить на тонкой нити незаряженную стеклянную или янтарную палочку и поместить ее рядом с положительно заряженной сферой, то палочка установится так, что ее ось будет направлена по силовым линиям электрического поля. Получается, что на ближайшем к шару конце палочки появляется отрицательный заряд, противоположный по знаку заряду шара, а на другом ее конце возникнет заряд положительный. Концы палочки становятся как бы электрическими полюсами. Поэтому рассматриваемое явление получило название п о л я р и з а ц и и. В любом теле часть зарядов свободно перемещается под действием электрического поля, создавая электрический ток, а связанные заряды поляризуются.

Поляризация — важнейшая характеристика диэлектрика. В зависимости от того, преобладает ли движение свободных зарядов, или происходит поляризация, вещества делят на два класса — п р о в о д н и к и и *диэлектрики.*

Поляризация диэлектрика и индукция зарядов на проводнике — совершенно различные явления. Разрезав в электрическом поле проводник на две части, можно отделить разноименные электрические заряды, и, напротив, «разделить» поляризационные заряды диэлектрика невозможно. В *металлах* отрицательные свободные заряды — *электроны проводимости* — перемещаются на большие расстояния.

Янтарная палочка, подвешенная на нити вблизи положительно заряженной сферы, устанавливается так, что ее ось направлена по силовым линиям электрического поля.

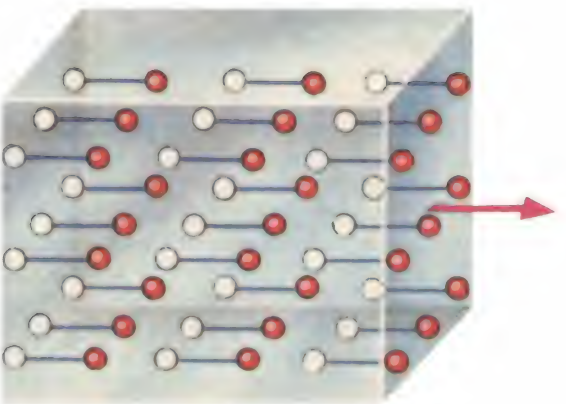


В диэлектриках положительные и отрицательные заряды связаны друг с другом и могут смещаться только в пределах одной молекулы (по-другому можно сказать, что у диэлектриков целиком заполнена зона, см. *Твердое тело*).

Без электрического поля заряды разных знаков распределены по объему диэлектрика равномерно. Под действием внешнего поля заряды, входящие в каждую молекулу, смещаются в противоположных направлениях. Это смещение проявляется в виде появления зарядов на поверхности диэлектрика, помещенного в электрическое поле, — поляризации.

Поляризация протекает по-разному в зависимости от вида химической связи в веществе диэлектрика. Так, например, в алмазе химическая связь ковалентная, и поляризация происходит лишь благодаря деформации электрон-

В ионных кристаллах в электрическом поле сдвигаются относительно друг друга ионы.



ных атомных оболочек в электрическом поле. В ионных кристаллах, таких, как каменная соль, в электрическом поле сдвигаются относительно друг друга ионы. В них происходит и деформация электронных оболочек, но это явление вносит незначительный вклад в полную поляризацию ионного кристалла по сравнению с вкладом ионов. Если молекулы вещества обладают собственным дипольным электрическим моментом (см. *Диполь*), то такой *диэлектрик* называют полярным. В полярных диэлектриках под действием внешнего электрического поля электрические дипольные моменты ориентируются вдоль него.

Поляризацию диэлектрика характеризуют вектором поляризации $\vec{P}$, который равен сумме электрических дипольных моментов всех молекул единицы объема вещества. Таким образом, эта величина — дипольный момент, приходящийся на единицу объема вещества диэлектрика. В случае изотропных диэлектриков $\vec{P} = \varepsilon_0 \varkappa \vec{E}$. Величина $\varkappa$ получила название диэлектрической восприимчивости вещества. Электрическое поле в диэлектрике описывают вектором электрической индукции $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$. Для однородного диэлектрика $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}(1 + \varkappa) = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$. Следовательно, диэлектрическая проницаемость вещества $\varepsilon = 1 + \varkappa$.

Диэлектрическая проницаемость характеризует ослабление внешнего электрического поля в диэлектрике поляризационными зарядами. Так, при полном заполнении конденсатора диэлектриком, если заряженный конденсатор отключен от внешней цепи, напряженность поля в конденсаторе убывает в ε раз. Наибольших значений величина ε достигает в постоянном электрическом поле у полярных диэлектриков. Например, ε воды равна 81. Величина ε зависит от частоты колебаний электрического поля, так как поляризация не происходит мгновенно, а на нее требуется определенное время. Характерное время τ очень мало у веществ с ковалентной химической связью. У ионных кристаллов оно больше: $\tau \sim 10^{-13}$с, а у полярных диэлектриков $10^{-6} — 10^{-8}$с. С увеличением частоты колебаний электрического поля, в котором помещен диэлектрик, поляризация убывает и стремится к величине, близкой к единице (электроны не успевают колебаться вслед за полем).

Поляризация может происходить в некоторых диэлектриках не только под действием электрического поля, но и в результате механических напряжений, возникающих в нем. Такие диэлектрики называют пьезоэлектриками (см. *Пьезоэлектричество*).

Удельное электрическое сопротивление диэлектриков на много порядков выше удельного сопротивления проводников ($10^{-6} \div 10^{-4}$ Ом/см) и заключено в интервале от 10^{8} до 10^{17} Ом/см.

Диэлектрики используют для изоляции элементов электротехнических устройств. В квантовой электронике из диэлектрических материалов изготовляют основные элементы квантовых генераторов, эти материалы широко используются также в *оптике*, в частности в виде разнообразных кристаллов. Очень важный случай применения диэлектриков — использование их в электрических конденсаторах. Обкладки конденсатора изолируют друг от друга с помощью диэлектриков с высоким значением величины ε, так как емкость конденсатора пропорциональна этой величине. Такие конденсаторы предназначены для работы в электрических полях низкой частоты. В конденсаторах, работающих в высокочастотных полях, применяют диэлектрики с ковалентной химической связью молекул — с малой величиной ε.

ДЛИНА

Прежде всего необходимо понять, что никакой длины самой по себе не существует. Понятие длины определяют с помощью эталона длины и рецепта измерения.

Приложим выбранный эталон к измеряемому предмету и посмотрим, сколько раз он уложился в предмете. Полученное число (оно, как правило, дробное) и есть длина предмета. В принципе любое измерение сводится к этому рецепту, если только измеряемый предмет неподвижен относительно эталона. Но если предмет, длину которого мы хотим определить, движется относительно измерительного прибора, этот рецепт не годится. Такой эталон попросту нельзя «приложить». И в этом случае длину движущегося предмета следует определять иначе.

Раз новый рецепт определения длины отличается от старого, то, естественно, и новая длина может отличаться от старой. Оказалось, что в действительности при больших скоростях длина движущегося тела заметно меньше длины покоящегося. Это — следствие специальной *теории относительности*.

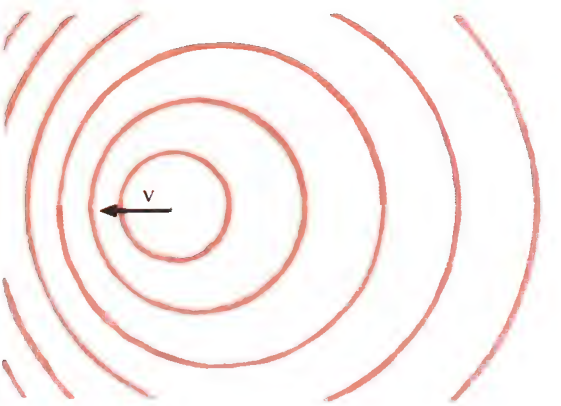
Итак, не существует никакого «свыше данного» понятия длины. Мы сами ее определяем. Длину движущегося тела можно определить двумя способами.

Первый способ. В лабораторной *системе отсчета* одновременно засекаем положения начальной и конечной точек движущегося тела. Затем по известному уже рецепту измеряем расстояние между этими точками. Результат измерения и будет длиной движущегося тела.

Второй способ. Измеряем скорость v тела относительно нашей системы отсчета.

Далее в какой-то точке системы засекаем моменты t_1 и t_2, когда с этой точкой совпали начальная и конечная точки измеряемого тела. Длину l движущегося тела определяем как $l = v_0(t_2 - t_1)$.

Оба способа определения дают один и тот же результат: $l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$, где l_0 — длина тела в состоянии покоя, c — скорость света. В первом случае в нашем определении появилось понятие *одновременности* двух событий («засечек» начальной и конечной точек измеряемого тела) в разных точках системы отсчета. Это понятие рассматривается в отдельной статье.



Волны, испускаемые движущимся источником, представляют собой множество окружностей, центр которых смещается в направлении движения источника.

ДОПЛЕРА ЭФФЕКТ

В известной истории об американском физике Роберте Вуде рассказывается, что, когда автомобиль Вуда проехал перекресток на красный свет и его остановили, Вуд объяснил полиции свою ошибку эффектом Доплера: для движущегося наблюдателя частота света источника меняется, и сигнал светофора показался ему зеленым. Говорят, что полицейский оказался не профаном. Он знал, что заметное изменение частоты могло произойти только при очень большой скорости автомобиля, близкой к скорости света. Поэтому он не стал спорить с ученым и просто оштрафовал его за превышение скорости.

С эффектом Доплера, по-видимому, встречался каждый. Когда нас обгоняет гудящий поезд или над нами пролетает самолет, то можно слышать изменение тона звука. Это тоже эффект Доплера.

Почему же происходит изменение частоты звука движущегося источника? Попробуем разобраться. Нарисуем картину *волн*, испускаемых движущимся источником. Скорость распространения *звука* не зависит от скорости источника, и картина волн будет представлять собой множество окружностей, центры которых смещаются в направлении движения источника (см. рис.). Пусть теперь наблюдатель стоит, например, за источником, так что источник удаляется от него со скоростью v. Предположим, что вначале расстояние между источником и наблюдателем было равно u (u — скорость распространения звука). Тогда через 1 с расстояние между ними будет $u + v$, и на этом расстоянии уместятся все $\omega/2\pi$ максимумов, созданных источником за единицу времени (ω — частота звука). До наблюдателя за 1 с дойдут только те максимумы, которые были вначале на расстоянии u от него. Поэтому и частота звука ω', воспринимаемого наблюдателем, будет меньшей, причем

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{u}{u + v}, \text{ откуда } \omega' = \omega\frac{1}{1 + v/u}.$$

Если источник приближается к приемнику, то аналогично получаем:

$$\omega' = \omega\frac{1}{1 - v/u}.$$

Теперь, когда мы разобрались в эффекте Доплера для звуковых волн, казалось бы, нет ничего проще, чем написать аналогичные формулы для с в е т а: достаточно вместо скорости звука u поставить всюду скорость света c — и ответ готов. Однако дело обстоит не столь просто. Например, если скорость источника не мала по сравнению со скоростью света, то необходимо еще учесть, что собственная частота источника ω различна в тех случаях, когда он движется и когда он покоится из-за релятивистского (так его называют в *теории относительности*) сокращения времени.

Теория относительности Эйнштейна, учитывающая это сокращение времени, дает следующую формулу для эффекта Доплера:

$$\omega' = \omega_0\frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - (v/c)\cos\Theta},$$

где ω_0 — частота света, излучаемая покоящимся источником, Θ — угол между направлением излучения и скоростью источника v.

Эта формула сейчас уже подтверждена многочисленными экспериментами, и эффект Доплера служит мощным орудием исследования окружающего нас мира. И как это ни поразительно, именно то его проявление, в применении к которому он был высказан впервые более ста лет тому назад профессором Венского университета Христианом Доплером (он утверждал, что свет, испускаемый звездой, удаляющейся от нас, должен смещаться к красному концу спектра), явилось важным доказательством одного из самых интересных результатов современной физики — вывода о том, что наша Вселенная непрерывно расширяется (см. *Пространство, Космология*).

Е, Ж, З

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Результат измерения физической величины обычно выражают в виде числа. Говорят о длине в 1 метр, расстоянии в 5 миль, скорости корабля в 15 узлов и т. д. Для каждой физической величины существует определенный условный масштаб, есть единицы, в которых эта величина измеряется.

В древние времена единицы выбирались произвольно и в разных местах Земли по-разному. В трудах древних авторов часто невозможно понять, что́ означает то или иное численное значение длины, веса, стоимости монеты.

В наше время бо́льшая часть единиц становится универсальной, хотя нефть до сих пор измеряется в баррелях, алмазы — в каратах, скорость на море — в узлах, а на суше — в км/ч. Принятая сейчас Международная система единиц (СИ) (см. с. 339) дает для всех физических величин единый масштаб, к которому можно относить и любые специальные единицы, принятые в разных отраслях науки и техники и в разных странах.

В *механике* используются три масштаба. Два из них связаны с геометрией, с расстоянием и временем, эталоны для них — длина *волны* и излучение *атомов*. В мире, где все тела двигались бы только по *инерции*, только равномерно и прямолинейно, никаких других единиц не понадобилось бы.

Для описания взаимодействия тел с помощью уравнений механики введена еще и третья единица — *масса*. Эталон массы пока еще не связан с атомами, и она измеряется сравнением с массой стандартного цилиндра, хранящегося в специальном институте — Палате мер и весов.

Развитие квантовой физики и теории *тяготения* показало, что в природе существуют естественные эталоны, более фундаментальные, чем характеристики *атомов* и *молекул*. Если именно такие величины выбрать в качестве единиц измерения, то мы получили бы естественную систему единиц, не связанную ни с каким конкретным веществом или прибором.

Такой естественной единицей является с к о р о с т ь с в е т а в *вакууме*, которая, как известно, не зависит от скорости движения источника или наблюдателя. Скорость света, очевидно, связывает между собой *длину* и *время*. Астрономы измеряют длину световыми годами — длиной пути, который свет проходит в 1 год (1 св. год $= 9{,}463 \cdot 10^{12}$ км).

Второй такой единицей может служить п о с т о я н н а я П л а н к а $\hbar$ — отношение энергии кванта к его частоте ($E = \hbar\omega$). Постоянная Планка имеет размерность Дж·с.

Из двух величин c и $\hbar$ можно построить единицу для измерения электрического заряда, вернее, его квадрата. Заряд *электрона* e выражается в этих единицах:

$$e = (\hbar c/137{,}0360)^{\frac{1}{2}}.$$

В качестве единицы *массы* можно выбрать массу какой-нибудь элементарной частицы. Если для этого использовать массу электрона, то мы получим единицы для измерения *длины*:

$$\lambda_e = \hbar/mc = 3{,}862 \cdot 10^{-11} \text{ см}.$$

Единица *времени* получается отсюда как время, в течение которого свет проходит расстояние, равное λ_e.

При таком выборе единиц остается произвол лишь в выборе электрона, а не какой-либо другой частицы. В мире *элементарных частиц* масс очень много, и до сих пор не ясно, какие из них более фундаментальны.

Можно построить систему единиц, которая лишена произвола и в которой все единицы составлены из фундаментальных постоянных, если добавить к c и $\hbar$ еще г р а в и т а ц и о н н у ю п о с т о я н н у ю γ (см. *Тяготение*). Это так называемая с и с т е м а П л а н к а, используемая в науке о происхождении Вселенной — *космологии*.

В этой системе единицы имеют очень непривычные величины. Приведем некоторые из них.

Единица длины $l_p = (\hbar\gamma/c^3)^{\frac{1}{2}} = 1{,}61 \cdot 10^{-33}$ см.

Единица времени $t_p = (\hbar\gamma/c^5)^{\frac{1}{2}} = 0{,}54 \cdot 10^{-43}$ с.

Единица массы $m_p = (\hbar c/\gamma)^{\frac{1}{2}} = 2{,}18 \cdot 10^{-6}$ г.

Эти единицы определяют масштабы тех явлений, в которых силы гравитационные оказываются того же масштаба, что и силы электромагнитные.

До сих пор речь шла лишь о единицах, с которыми имеет дело *механика*. В э л е к т р и ч е с к и х и м а г н и т н ы х я в л е н и я х до последнего времени все измерения сравнивались с эталонами. Конечно, заряд *электрона* в принципе можно измерить, если измерить силу отталкивания двух электронов, но такое измерение нельзя сделать сколько-нибудь точно по современным требованиям. Поэтому практически вольт, ом и кулон не совпадают точно с этими же единицами в системе СИ. Здесь на помощь приходит *квантовая механика*, позволяющая вычислить возможные значения энергии электрона в электрическом или

магнитном полях. Эти значения энергии определяют разные эффекты, и можно подобрать такие условия для сверхпроводников и полупроводников, при которых измеряемые величины выражаются через заряд электрона и постоянную Планка и не зависят от температуры, свойств источника тока и т. д. Так, частота излучения в *эффекте Джозефсона* определяет разность потенциалов (эталон вольта), а разность потенциалов в эффекте Холла определяет сопротивление образца (эталон ома). Такие электрические эталоны вольта и ома собираются ввести как основные — этим будет завершено создание естественной системы единиц.

Любопытно отметить, что в системе единиц Планка единица сопротивления имеет вполне разумную величину. Она просто равна обратной величине скорости света (сопротивление, как известно, имеет размерность, обратную скорости):

$$r_p = \frac{1}{c} = 3{,}3357 \cdot 10^{-11}\text{с/см}.$$

В системе СИ эта величина равна 30 Ом, так как 1 Ом $= (9 \cdot 10^{11})^{-1}$с/см.

ЕДИНСТВО СИЛ ПРИРОДЫ

Известно четыре типа *сил*, действующих между *элементарными частицами* и тем самым определяющих все явления природы. Это гравитационное (см. *Тяготение*), *слабое*, электромагнитное и *сильное взаимодействия*. Два из них — гравитационное и электромагнитное — известны давно. Их радиус действия неограничен, и поэтому они проявляются не только между элементарными частицами, но и в окружающих нас макроскопических телах. Гравитационное взаимодействие доминирует в небесной механике. Электромагнитное взаимодействие, хотя оно и намного сильнее, не может с ним тут конкурировать, поскольку обычно макроскопические тела не заряжены. Электромагнитное взаимодействие преобладает внутри вещества. Это оно определяет химические связи, излучение света, намагничивание, — словом, все явления, наблюдаемые в *молекулах* и *атомах*. Гравитационное взаимодействие здесь не сказывается из-за его малой силы, а слабое и сильное взаимодействия — из-за их короткого радиуса действия.

Внутри *атомного ядра* проявляются *сильное* и *слабое взаимодействия*. Сильное взаимодействие скрепляет нуклоны (*протоны* и *нейтроны*) в ядре и *кварки* внутри нуклонов. Эта вторая — основная — роль сильного взаимодействия выяснилась сравнительно недавно. Что касается *слабого взаимодействия*, то оно вызывает переходы между разными типами кварков и, в частности, определяет β-*распады* нуклонов в ядрах. При β-распаде один из трех кварков, составляющих нуклон, переходит в кварк другого типа и излучает электроны и антинейтрино (см. *Бета-распад*).

Слабые взаимодействия вызывают также взаимные переходы между различными типами *лептонов*, например распад мюона на электрон, нейтрино и антинейтрино.

Трудно сравнивать силы, по-разному зависящие от расстояния. Однако если выбрать конкретное расстояние, то можно сравнить потенциальные энергии, соответствующие различным силам. Так, для внутриядерного расстояния 10^{-14} см потенциальные энергии сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий относятся как $1 : 10^{-2} : 10^{-5} : 10^{-38}$.

Физики пытаются уловить связь между силами природы. Выяснилось, что электромагнитное и слабое взаимодействия связаны друг с другом. За обнаружение этой связи — теорию электрослабых сил — Ш. Глэшоу, С. Вайнберг и А. Салам получили в 1979 г. Нобелевскую премию. Теорию электрослабых сил нельзя считать полностью доказанной, но основная ее идея проверена многочисленными опытами. Эта идея сводится к тому, что электромагнитное поле является частью более общего электрослабого поля, состоящего из нескольких форм, или компонент. Всего компонент в четыре раза больше, чем в электромагнитном поле. Элементарные частицы — *кварки* и *лептоны* — излучают и поглощают кванты электрослабого поля, которыми являются уже известные *фотоны* и новые частицы, так называемые промежуточные или векторные бозоны W^+, W^-, Z^0 — массивные частицы со *спином* 1. Они имеют огромную массу, в 100 раз больше нуклонной. Промежуточные $W^{\pm}$-бозоны были недавно обнаружены в опытах на встречных протон-антипротонных пучках при колоссальной полной энергии, превышающей 500 ГэВ. Их масса ($M_w \approx 80$ ГэВ) очень хорошо согласуется с предсказаниями электрослабой теории. Таким образом, получено новое убедительное доказательство единства электромагнитных и слабых взаимодействий.

Вернемся к нашему путешествию в глубь микромира. Радиус действия слабых сил приблизительно 10^{-16} см. На этом масштабе они объединяются с электромагнитными силами, а на меньших масштабах электрослабые поля неразделимы, подобно электрическому и магнитному полю быстро движущегося заряда.

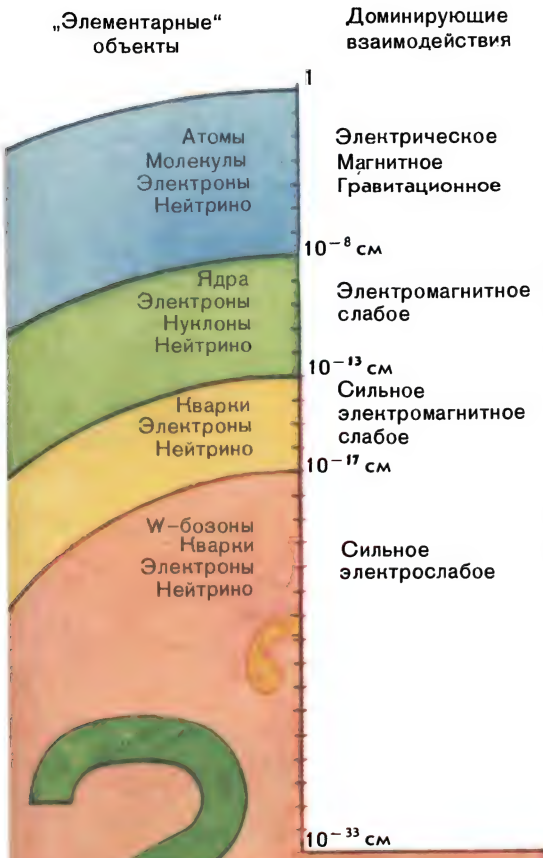
Что же происходит дальше? Тут начинается область гипотез. Согласно большинству из них, электрослабые взаимодействия объединяются с сильными приблизительно на масштабе 10^{-30} см. Пока трудно представить себе эксперименты на таких малых масштабах. Соответ-

ствующая энергия 10^{16} ГэВ вообще не может быть достигнута на ускорителе. (О соотношении между энергией пробной частицы и размером области взаимодействия см. в ст. *Ускорители заряженных частиц*.)

Однако решающий эксперимент для проверки этого, так называемого Великого объединения может быть проведен в ближайшие годы. Дело в том, что почти неизбежным следствием Великого объединения является нестабильность *протона*.

Это процесс совершенно нового типа, при котором в нуклонах происходят уже не переходы одних кварков в другие, как при β-распаде, а превращения кварков в антикварки и лептоны. Оказывается нарушенным закон сохранения барионного заряда. Вероятности таких превращений, конечно, очень малы, иначе просто не существовали бы ни мы сами, ни окружающая нас ядерная *материя* — она бы рассыпалась на более легкие частицы.

По теоретическим оценкам, время жизни протона должно составлять $10^{30} — 10^{34}$ лет. Это намного больше, чем возраст Вселенной.



Но даже такие крайне редкие процессы можно попытаться обнаружить. Для этого создаются детекторы протонных распадов, содержащие несколько тысяч и даже десятки тысяч тонн вещества (т. е. 10^{33} — 10^{34} нуклонов). Для защиты от фона *космических лучей* такие установки помещают глубоко под землей и окружают специальной охранной системой из вспомогательных счетчиков. Тогда за время порядка 1 года можно надеяться зарегистрировать несколько протонных распадов. Эксперименты уже начались. Но пока они позволили только установить, что время жизни протонов превышает 10^{31} лет.

Другое вероятностное следствие Великого объединения — это существование «монополей», одиночных магнитных зарядов. Их масса должна быть фантастически велика. Опыты по обнаружению космических «монополей» сейчас ведутся. Однако, как и для поисков распада протона, с выводами надо еще подождать.

А. Эйнштейн предполагал возможность объединения электромагнитного взаимодействия с гравитационным. Теперь, имея в виду объединение электромагнитного взаимодействия со слабым и, возможно, сильным взаимодействиями, это будет, можно сказать, Суперобъединение — все четыре силы природы сводятся к одной, исходя из какого-то фундаментального

принципа. В последнее время все чаще высказывается мысль, что этот принцип геометрический, как и принцип общей *теории относительности*.

Итак, физики стремятся найти единое объединение всем силам природы. Довольно много уже удалось сделать, но еще больше предстоит.

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Жидкими кристаллами называются жидкости, которые состоят из молекул анизотропной формы, сохраняющих определенный порядок в своем расположении относительно друг друга. У молекул жидких кристаллов можно четко выделить характерные оси: в таких молекулах атомы располагаются вдоль избранной линии (молекулы — стержни) или лежат в выделенной плоскости (молекулы — диски). В жидком кристалле имеется особое направление, как в твердом кристалле, вдоль которого ориентируются длинные оси молекул (рис. 1 а) или плоскости молекул (рис. 1б). При этом жидкий кристалл может быть, действительно, жидким, как вода, т. е. *центры масс* молекул не образуют правильную (кристаллическую) решетку, а располагаются хаотично в пространстве и могут в нем свободно перемещаться.

Возникновение особого направления вызвано взаимодействием молекул указанной формы, причем важную роль здесь играют как силы притяжения, так и силы отталкивания. Силы притяжения — электрического происхождения, они возникают и между электрически нейтральными молекулами благодаря случайным смещениям в атомах отрицательно заряженных электронных облаков относительно положительно заряженных ядер. Такие совокупности двух разноименных зарядов, называемые электрическими *диполями*, создают в окрестностях нейтральных атомов

Рис. 1а. В результате взаимодействия молекул жидких кристаллов друг с другом длинные оси молекул выстраиваются в определенном направлении.

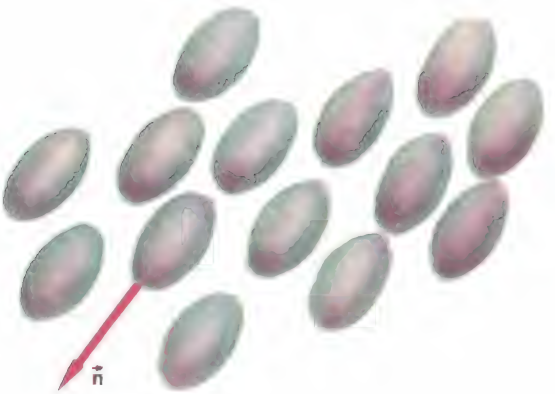


Рис. 1б. В жидких кристаллах плоскости молекул также ориентируются вдоль особого направления

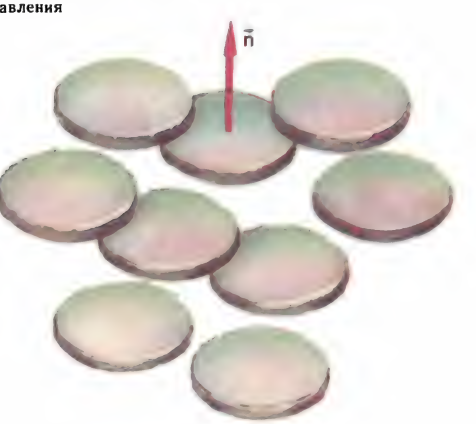


Рис. 2а. Электрическое поле возникает в окрестности атома из-за смещения в атоме отрицательно заряженного электронного облака относительно положительно заряженного ядра.

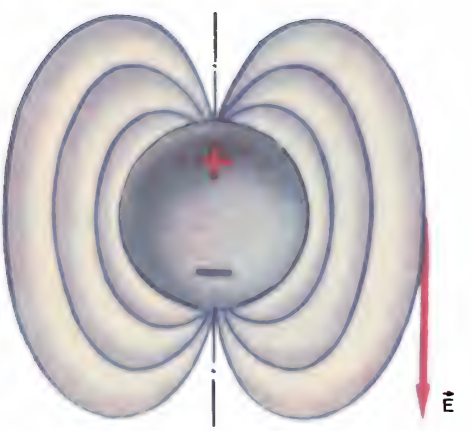
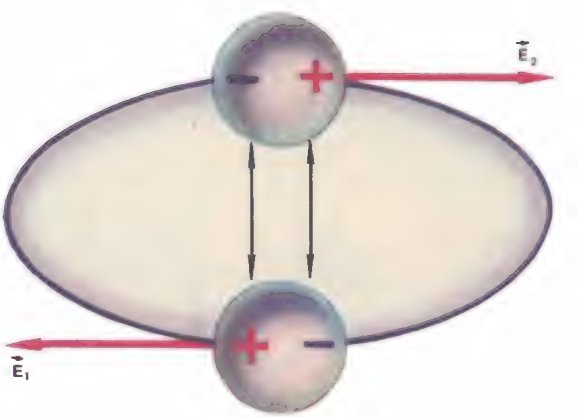


Рис. 2б. Во всякой жидкости между атомами и молекулами возникают силы притяжения благодаря образованию электрических диполей.



электрические поля (рис. 2а), которые поддерживают это разделение зарядов (рис. 2б). В результате разноименно заряженные части атомов, а значит, и атомы целиком притягиваются друг к другу. Чем больше атомов в молекуле, тем сильнее притягиваются молекулы, причем большая часть атомов одной молекулы стремится оказаться вблизи другой молекулы, а это возможно только тогда, когда длинные оси или плоскости соседних молекул параллельны.

На близких расстояниях по законам *квантовой механики* молекулы отталкиваются, т. е. они не могут проникать друг в друга. Поэтому, например, молекулы-стержни, помещенные в относительно небольшой объем, мешают друг другу при случайных взаимных поворотах, т. е. при высокой концентрации стержней в растворе силы отталкивания также вызывают параллельную ориентацию таких молекул.

При относительно высокой температуре или низкой концентрации молекулярного раствора тепловые толчки достаточно сильны, чтобы разрушить ориентационный порядок в системе молекул. При повышении температуры или понижении концентрации обязательно наступает момент, когда хаотическое тепловое движение становится преобладающим и жидкий кристалл превращается в обычную жидкость (плавится).

При понижении температуры он превращается в твердый кристалл.

Особые направления в жидких кристаллах, как и в твердых, называются о п т и ч е с к и м и о с я м и, так как с их существованием связаны замечательные оптические свойства этих материалов (двойное лучепреломление, поворот плоскости *поляризации света* и др.). В отличие от твердых кристаллов, где оптические оси жестко закреплены, в жидких кристаллах направления оптических осей можно легко изменять с помощью самых различных воздействий, в том числе электрическим полем. Для управления оптическими свойствами жидких кристаллов требуются весьма малые напряжения (около 1 *В*).

Это объясняется тем, что все их молекулы взаимосвязаны и ориентированы одинаково, и достаточно повернуть одну из них, чтобы весь коллектив молекул изменил свою ориентацию.

Благодаря таким электрооптическим эффектам жидкие кристаллы приобрели большое практическое значение. Тонкие слои этих кристаллов (толщиной в сотую долю микрометра) применяются при изготовлении табло электронных часов, калькуляторов, экранов телевизионных приемников.

Некоторые вещества в жидкокристаллическом состоянии способны смешиваться между собой и образовывать жидкие кристаллы с различными структурами и свойствами.

ЖИДКОСТИ

Жидкости — это вещества в состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. Для них характерна большая подвижность частиц и малое свободное пространство между ними. Отсюда — два основных свойства жидкостей: в отличие от *твердых тел* они легко меняют форму, но, как и твердые тела, обладают весьма малой сжимаемостью.

Жидкое состояние промежуточное между газообразным и твердым по многим признакам. *Вязкость* жидкостей намного меньше вязкости твердых тел и намного больше вязкости *газов*. Расстояние между молекулами газа в несколько раз превышает размеры молекул; в жидкости молекулы размещаются вплотную друг к другу. Поэтому плотность жидкости на несколько порядков больше плотности газов (при нормальном давлении) и почти не отличается от плотности твердых тел; так, плотность металлов при плавлении меняется в среднем на 3%. По величине внутренней энергии жидкость обычно значительно ближе к твердому телу, чем к газу; теплота *плавления*, как правило, не превышает 10% от теплоты *испарения*. *Теплоемкость* жидкости вблизи температуры плавления также близка к теплоемкости твердого тела.

Однако форма жидкого тела, как и газа, определяется формой сосуда.

В отличие от кристаллов в жидкости нет дальнего порядка, а имеется только ближний. Это значит, что определенный порядок в расположении молекул имеется, но если в кристаллах этот порядок один и тот же во всех областях кристалла, то в жидкости он может быть в различных областях различным. Прямым следствием отсутствия дальнего порядка является то, что свойства жидкости по всем направлениям одинаковы; говорят, что она и з о т р о п н а в отличие от кристалла, который а н и з о т р о п е н (греческие слова «изос» означают «равный», «одинаковый», «анизос» — «неравный», «тропос» — «направление»). Жидкости — это очень широкий класс веществ: от простых, которые действительно изотропны и в которых отсутствует дальний порядок, до сложных, полимерных, в которых есть элементы дальнего порядка и анизотропии.

Наиболее характерное молекулярное свойство жидкости — *поверхностное натяжение*. Оно обусловлено тем, что молекулы в поверхностном слое находятся в особом состоянии по сравнению с молекулами внутри жидкости. Последние равномерно окружены со всех сторон соседями, а молекулы на поверхности — нет. Поэтому равнодействующая сил сцепления стремится втянуть внутрь молекулы поверхностного слоя, и для увеличения поверхности, например для растягивания жидкой пленки,

надо затрачивать работу на извлечение молекул изнутри на поверхность. Работа образования единицы поверхности называется *поверхностным натяжением*. Численно поверхностное натяжение равно силе, действующей на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости и стремящейся уменьшить эту поверхность. Под действием поверхностного натяжения жидкость принимает форму шара, обладающего при данном объеме наименьшей поверхностью. В знаменитом опыте Плато капля одной жидкости, помещенная в другую жидкость той же плотности, не смешивающуюся с первой, принимала сферическую форму. Такова же форма маленьких капелек ртути на стеклянной пластинке или капелек воды на покрытой парафином поверхности стекла. Ртуть не взаимодействует со стеклом, не смачивает его, а вода не смачивает парафин. Силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела вызывают растекание, например, капли воды по обезжиренному стеклу, сила тяжести сплющивает каплю, и тем сильнее, чем больше ее размеры. Подробно об этом можно прочитать в книге Я. Е. Гегузина «Капля» (М.: Наука, 1973).

Вязкость жидкости увеличивается с уменьшением температуры и скачком возрастает при кристаллизации. При переохлаждении жидкости ниже температуры плавления вязкость также сильно увеличивается, что замедляет кристаллизацию и способствует возникновению *аморфного* стеклообразного *состояния*. При нагревании жидкости обычно расширяются, за исключением воды (в интервале от 0 до 4°С).

Как показал нидерландский ученый Я. Вант-Гофф, молекулы растворенного вещества в жидком растворе ведут себя подобно газу

в таком же объеме и оказывают специфическое давление, которое он назвал осмотическим. Осмотическое давление впервые наблюдал в 1748 г. французский физик Нолле в известном опыте с полупроницаемой перегородкой из бычьего пузыря. Пузырь затягивал нижний конец сосуда *A* с раствором сахара в воде, погруженного в сосуд *B* с чистой водой. Молекулы воды могут проходить через пузырь, а значительно большие по размеру молекулы сахара — нет. В результате уровень раствора в сосуде *A* повышается, пока гидростатическое давление поднявшегося столба жидкости не окажется равным осмотическому давлению растворенного сахара.

Осмотическое давление велико и достигает в разбавленных растворах десятков тысяч атмосфер. Эффекты, связанные с осмотическим давлением, играют большую роль в природе (проникновение питательных веществ из почвы в растения , обмен веществ в живых организмах).

С жидкостями мы встречаемся буквально на каждом шагу — и в природе, и в технике. Немыслимо спутать жидкость с твердым телом или газом: уж очень различны их свойства. Чтобы объяснить отличие свойств жидкостей от свойств газов и твердых тел, надо обратиться к их молекулярной структуре. Если в газе молекулы находятся на больших расстояниях друг от друга, то в жидкости они размещаются вплотную друг к другу. При этом, в отличие от твердых тел, молекулы жидкости не образуют упорядоченной пространственной «решетки».

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Когда М. В. Ломоносов и А. Лавуазье формулировали закон сохранения вещества, они представляли его себе как закон сохранения *массы*. Полная масса всех составных частей в начале химической реакции равняется массе в конце ее, какие бы реакции ни происходили. Кроме того, в химической реакции не изменяется количество атомов любого участвующего в ней элемента — атомы элементов только переходят от одной молекулы к другой.

В XX в. этот закон был существенно уточнен, так как во многих случаях он оказался неправильным. Разберем нарушение этого закона на примере превращения водорода в гелий.

Ядро атома одного из *изотопов* He^3 состоит из двух *протонов* и одного *нейтрона*. Проследим за реакцией его образования. Такую реакцию можно осуществить в два этапа. Сначала, облучая водород нейтронами, можно получить д е й т о н — ядро, состоящее из нейтрона и протона. Когда к такому ядру присоединяется *электрон*, получается атом водорода, но с массой, в два раза большей массы обычного атома. Если облучить воду, содержащую тяжелый водород (тяжелую воду), протонами, то будут получаться ядра изотопа гелия He^3. При этом выделяется громадная энергия, которая уходит в форме γ-квантов, т. е. *электромагнитных волн*.

Откуда эта энергия берется? Ядерные частицы — н у к л о н ы (нейтроны и протоны) — притягиваются друг к другу ядерными силами, которые действуют только на малых расстояниях, приблизительно 10^{-13} см, зато на этих расстояниях они несравненно больше всех других известных нам сил.

При соединении нейтрона и протона в дейтон эти частицы ускоряются, а всякая заряженная частица при ускорении излучает электромагнитные волны.

Итак, было два протона и нейтрон, а получилось ядро гелия и огромная энергия, которая выделилась в форме γ-квантов (см. *Гамма-излучение*).

Вот тут и потерялась масса. Молекулярная масса протона равна $M_p = 1{,}00728$, масса нейтрона $M_n = 1{,}00867$, а масса ядра гелия $M_{He^3} = 3{,}01636$. Здесь выбрана такая единица массы, при которой атомная масса изотопа углерода ^{12}C равна 12. Следовательно,

$$2M_p + M_n = M_{He^3} + M_\gamma.$$

$$2 \cdot 1{,}00728 + 1{,}00867 = 3{,}02323 = 3{,}01636 + M_\gamma.$$

Если массу приписывать только нейтрону, протону и гелию, то закон сохранения массы

МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛОМОНОСОВ (1711 — 1765)

Жизнь и деятельность Михаила Васильевича Ломоносова оставили неизгладимый след в развитии отечественной науки, техники и культуры.

Ломоносов родился в деревне Денисовке Архангельской губернии, в семье крестьянина-помора. Стремясь получить образование, юный Ломоносов в конце 1730 г. отправился пешком в Москву. Здесь, выдав себя за сына дворянина, он в январе 1731 г. поступил в московскую Славяно-греколатинскую академию. В 1735 г. в числе лучших учеников Ломоносов был послан в Петербург, в только что открывшийся при Академии наук университет, а затем в Германию для продолжения образования. В 1741 г. он вернулся в Петербург, в Академию наук.

Научная деятельность Ломоносова была весьма разносторонней и протекала в непрерывной борьбе за процветание самостоятельной русской науки, за развитие производительных сил России.

В 1746 г. он первым стал читать публичные лекции по физике на русском языке, тогда же опубликовал перевод краткого изложения «Экспериментальной физики» Х. Вольфа. В 1748 г. по его инициативе была построена первая в России научно-исследовательская химическая лаборатория, в которой Ломоносов проводил свои исследования в области физики и химии.

Проявляя заботу о распространении просвещения в России, Ломоносов настаивал на создании университета, доступного всем слоям населения. В 1755 г. по его проекту и благодаря его хлопотам был организован Московский университет, носящий ныне имя М. В. Ломоносова.

Ломоносов убежденно отстаивал а т о м и с т и к у — учение о прерывистом (зернистом) строении *материи*, состоящей из отдельных чрезвычайно малых частиц. Он развивал представления о том, что частицы материи существуют в двух формах: это *атом* («элемент») и *молекула* («корпускула») как некоторая замкнутая совокупность атомов. Атомизм был для Ломоносова прежде всего теоретической основой, которая давала ключ к разгадке самых разнообразных

нарушится. Для сохранения этого закона нужно приписать массу также и гамма-излучению. Здесь мы столкнулись с частным случаем общего закона природы, открытого А. Эйнштейном: масса тела изменяется с изменением его энергии, в какой бы форме эта энергия ни содержалась. Масса M связана с энергией E следующей формулой:

$$M = \frac{E}{c^2}$$

(здесь c — скорость света), поэтому и M_γ — масса γ-квантов равна:

$$M_\gamma = \frac{E_\gamma}{c^2},$$

где E_γ — энергия γ-квантов.

Теперь закон сохранения массы восстанавливается, или, лучше сказать, объединяется с законом сохранения энергии. В самом деле, если покоящемуся протону приписать энергию E_p, а нейтрону E_n, то, умножая формулу для равенства масс на c^2, получим *закон сохранения энергии:*

$$2 \cdot E_p + E_n = E_{\mathrm{He}^3} + E_\gamma.$$

Заметим, что в реакции электрический заряд двух протонов как раз равен заряду He (нейтрон — частица, не имеющая заряда).

Кроме того, число нуклонов слева равно числу нуклонов справа. Чтобы подчеркнуть эти законы сохранения, ядерную реакцию записывают в виде:

$$2{}^1_1p + {}^1_0n = {}^3_2\mathrm{He} + \gamma.$$

Верхние значки дают число ядерных частиц, участвующих в реакции, а нижние — электрический заряд, выраженный через заряд электрона. Сумма верхних значков слева и справа равна так же, как и сумма нижних.

Таким образом, закон сохранения массы после того, как была установлена связь массы с энергией, превратился в *закон сохранения энергии.* Что же касается сохранения количества атомов химических элементов, то этот закон совсем не соблюдается в *ядерных реакциях* (водород превратился в гелий). Вместо него действуют во всех случаях два закона сохранения: закон сохранения заряда и закон сохранения числа нуклонов, или, точнее, числа барионов, который называется законом сохранения барионного заряда.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Хорошо известно, что кинетическая энергия может превращаться в потенциальную. Самый простой пример — камень, подброшенный вверх. В верхней точке, когда камень на мгновение останавливается, вся кинетическая энергия переходит в потенциальную.

Но вот более интересный пример. Очень легко самому сделать игрушку, которая на первый взгляд нарушает закон сохранения энергии. Снаружи это просто круглая банка из-под какао. Вы кладете ее на пол и толкаете. Она

физических явлений. Строение вещества, теплопередача, упругие свойства воздуха, агрегатные состояния тел, звук и другие физические явления — все это может быть объяснено, по Ломоносову, с помощью различных форм движения атомов или их сочетаний.

В основу молекулярно-кинетической теории Ломоносов положил свою формулировку закона сохранения материи и движения: «...Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает».

Учение Ломоносова о теплоте как о молекулярном движении, изложенное в его труде «Размышления о причине теплоты и холода» (1744), явилось выдающимся достижением, на столетие опередившим современную ему науку.

Значительное внимание М. В. Ломоносов уделял исследованиям атмосферного электричества, которые он проводил совместно с Г. В. Рихманом.

Ломоносов занимался и оптическими исследованиями. Он изобрел «ночезрительную трубу», позволявшую в сумерки более отчетливо различать предметы. Ученый сконструировал отражательный (зеркальный) телескоп. Его интересовали также астрономия и геофизика. В 1761 г. он открыл существование атмосферы на Венере. С помощью разработанной им конструкции маятника Ломоносов исследовал земное тяготение.

Научная деятельность Ломоносова охватывала почти все проблемы естественных и гуманитарных наук того времени. По образному выражению А. С. Пушкина, М. В. Ломоносов был «первым нашим университетом».

Как устроена «банка-бумеранг»? Кинетическая энергия банки переходит в энергию закручивания резины — банка останавливается. После остановки резина раскручивается и снова приводит банку в движение.

проходит некоторое расстояние и останавливается. Но сразу после остановки, к удивлению зрителей, она начинает катиться обратно. В чем же здесь дело?

Вот как устроена эта игрушка (см. рис.). По оси банки проходит жгут из резинок, таких, какие используются для моторчиков авиамоделей. Концы жгута прикреплены к дну и крышке банки. К середине жгута привязан на веревочке свинцовый грузик. Когда банка катится, грузик висит вертикально и резина при вращении банки закручивается. Кинетическая энергия банки переходит в потенциальную энергию закручивания резины, и банка останавливается. После остановки резина раскручивается и приводит в движение банку. Энергия из потенциальной снова превратилась в кинетическую.

Для проверки закона сохранения энергии нужно убедиться, что при обратном движении банки кинетической энергии оказалось столько же, сколько было вначале. Конечно, при этом всегда получается нехватка: часть энергии из-за трения переходит в тепло.

Как установить, что энергия, которая перешла в тепло, в точности равна нехватке кинетической энергии? Как сравнить тепловую и механическую энергии? Ведь вернуть тепловую энергию обратно в кинетическую не так легко, как в случае потенциальной энергии.

Для установления закона сохранения энергии нужно доказать, что при любом способе превращения определенного количества механической энергии в тепловую выделяется одно и то же количество тепла и, наоборот, когда совершается работа за счет охлаждения, это количество тепла переходит в такое же количество механической энергии.

Из школьного курса физики известно, что начало этому доказательству было положено в прошлом веке немецким ученым Ю. Майером и английским физиком Дж. Джоулем.

С тех пор закон сохранения энергии был точно проверен не только для перехода механической энергии в тепловую, но и для перехода в химическую и электромагнитную энергию, а также для перехода электрической или химической энергии в тепловую.

Какие бы явления ни изучались, каждый раз кажущееся несохранение энергии на самом деле означало переход энергии из одной формы в другую.

И все-таки в 30-х гг. XX в. физики усомнились в правильности закона сохранения энергии. Было изучено явление радиоактивного распада (см. *Радиоактивность*). Обнаружили, что энергия *электронов*, вылетающих в результате распада, всегда меньше, чем разность энергий ядер (см. *Ядро атома*) до и после распада.

Закон сохранения энергии был «спасен» следующим способом. Предположили, что наряду с *электроном* при радиоактивном распаде вылетает *нейтрино* — нейтральная частица, которая почти не взаимодействует с веществом и поэтому, не останавливаясь, вылетает из установки, унося с собой излишек энергии. Измерили даже количество движения ядра, которое возникает после вылета нейтрино в результате отдачи. Однако для окончательного доказательства существования нейтрино нужно было увидеть непосредственное действие нейтрино на вещество. Такой опыт был осуществлен в 1953 г. американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуэном. Поток нейтрино, которые образовались в результате радиоактивного распада ядер в ядерном реакторе, падал на воду. Нейтрино взаимодействовали с ядрами водорода *(протонами)*, и получались *нейтроны* и позитроны. Эту реакцию можно было установить, наблюдая γ-кванты (см. *Гамма-излучение*), которые возникают при аннигиляции образующихся позитронов с электронами окружающего вещества и при ядерном захвате нейтронов.

В чем же причина такого общего свойства природы? Почему закон сохранения энергии выполняется с такой большой точностью во всех известных случаях? Не может ли оказаться, что мы найдем такое явление, где энергия не будет сохраняться? Это настолько важные вопросы, что необходимо понять, не связан ли закон сохранения энергии с другими общими свойствами природы. Оказывается, закон сохранения энергии является строгим следствием равномерности хода *времени*.

Что же такое ход времени и что означает его равномерность? Ход времени определяется относительной скоростью протекания различных процессов в природе. Время прохождения космическим кораблем расстояния от Земли до Луны можно сравнить с временем прохождения того же расстояния светом. Ход стрелки часов можно определить числом периодов колебания света, излучаемого атомом за время перемещения стрелки на одно деление. Любое

измерение интервала времени означает сравнение ритмов разных процессов.

Равномерность хода времени означает, что всегда — и сегодня, и завтра, и через год — относительная скорость протекания всех процессов в природе одинакова.

Если какая-либо машина или лабораторная установка в этом году работает не так, как в прошлом, то нам всегда удается это объяснить износом деталей или изменением климата, но не изменением в ходе времени.

Равномерность хода времени установлена с колоссальной точностью на примере излучения *атомов*. Атомы на звезде излучают свет такой же длины волны, как и атомы сегодняшнего дня, даже если свет этот был излучен миллиард лет тому назад.

Все известные нам законы природы, в том числе и биологические, подтверждают равномерность хода времени.

Мы не будем приводить строгого доказательства того, что закон сохранения энергии вытекает из равномерности хода времени. Поясним лишь, как неравномерность хода времени приводит к несохранению энергии. Допустим, эта неравномерность проявилась в том, что в некоторый момент времени начала периодически изменяться константа всемирного *тяготения*. Тогда можно было бы извлекать энергию. Для этого надо поднимать грузы вверх в период слабого тяготения и сбрасывать их в период более сильного тяготения. Получился бы выигрыш в кинетической энергии. Очевидно, что неравномерность хода времени, т. е. изменение относительного ритма разных процессов, приводит к нарушению закона сохранения энергии.

Теперь не удивительно, что закон сохранения энергии выполняется во всех явлениях природы. Ведь он вытекает из такого общего свойства нашего мира, как равномерность хода времени.

ЗВУК

Мир наполнен самыми разнообразными звуками: тиканье часов и гул моторов, шелест листьев и завывание ветра, пение птиц и голоса людей. О том, как рождаются звуки и что они собой представляют, люди начали догадываться очень давно. Замечали, к примеру, что звук создают вибрирующие в воздухе тела. Еще древнегреческий философ и ученый-энциклопедист Аристотель, исходя из наблюдений, верно объяснял природу звука, полагая, что звучащее тело создает попеременное сжатие и разрежение воздуха. Так, колеблющаяся струна то уплотняет, то разрежает воздух, а благодаря упругости воздуха эти чередующиеся воздействия передаются дальше в пространство — от слоя к слою, возникают упругие *волны*. Достигая нашего уха, они воздействуют на барабанные перепонки и вызывают ощущение звука.

На слух человек воспринимает упругие волны, имеющие частоту в пределах примерно от 16 Гц до 20 кГц (1 Гц — 1 колебание в секунду). В соответствии с этим упругие волны в любой среде, частоты которых лежат в указанных пределах, называют звуковыми волнами или просто *звуком*. В воздухе при температуре 0° С и нормальном давлении звук распространяется со скоростью 330 м/с, в морской воде — около 1500 м/с, в некоторых металлах скорость звука достигает 7000 м/с. Упругие волны с частотой меньше 16 Гц называют инфразвуком, а волны, частота которых превышает 20 кГц, — *ультразвуком*.

Источником звука в *газах* и *жидкостях* могут быть не только вибрирующие тела. Например, свистят в полете пуля и стрела, завывает ветер. И рев турбореактивного самолета складывается не только из шума работающих агрегатов — вентилятора, компрессора, тур-

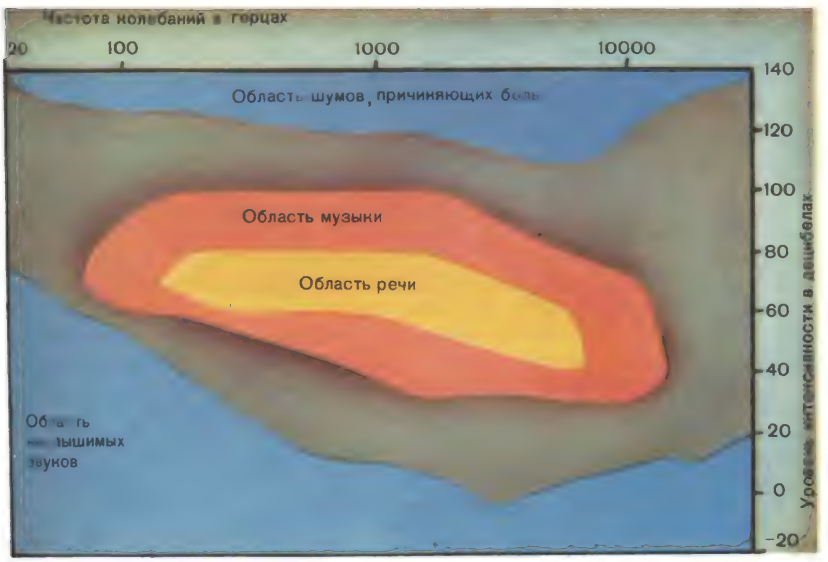
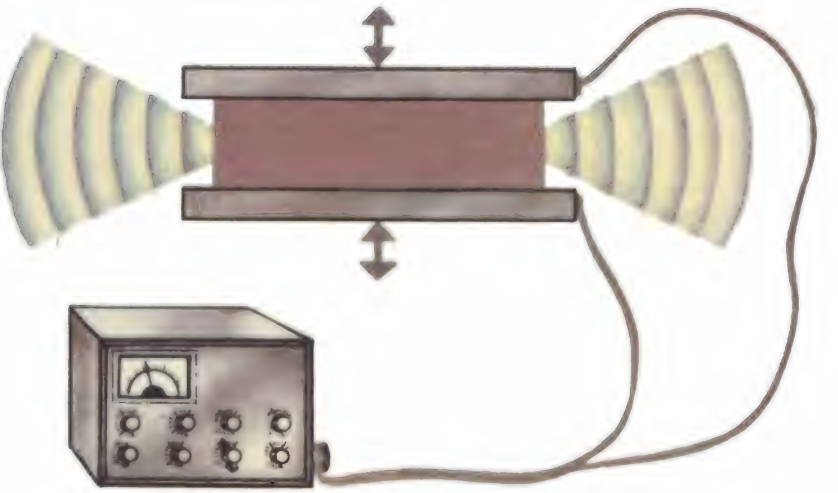


Диаграмма слышимости звуков.



В технических устройствах для возбуждения ультразвуковых волн используют обратный пьезоэлектрический эффект (см. *Пьезоэлектричество*). Кристалл, обладающий пьезоэлектрическими свойствами, помещают между металлическими обкладками, на которые подается переменное напряжение.

бины, камеры сгорания и т. д., но также из шума реактивной струи, вихревых, турбулентных потоков воздуха, возникающих при обтекании самолета на больших скоростях (см. *Турбулентность*). Стремительно несущееся в воздухе или в воде тело как бы разрывает обтекающий его поток, периодически порождает в среде области разрежения и сжатия. В результате возникают звуковые волны.

Звук может распространяться в виде продольных и поперечных волн. В газообразной и жидкой среде возникают только продольные волны, когда колебательное движение частиц происходит лишь в том направлении, в каком распространяется волна. В *твердых телах* помимо продольных возникают также и поперечные волны, когда частицы среды колеблются в направлениях, перпендикулярных к направлению распространения волны. Так, ударяя по струне перпендикулярно ее направлению, мы заставляем бежать волну вдоль струны.

Звуковые волны несут с собой энергию, которую сообщает им источник звука. Величину кинетической энергии, протекающей за одну секунду через один квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны, вычислил русский ученый Н. А. Умов. Эту величину назвали потоком энергии. Она выражает меру интенсивности, или, как говорят, силы звука. Чтобы вызывать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью. Величину ее называют поро-

ДИСКОВАЯ СИРЕНА

Генератор звуковых колебаний можно сделать, используя прерывание воздушной струи механическим затвором. Струю достаточной силы обеспечит домашний пылесос, шланг которого оканчивается самодельным наконечником в виде сужающегося конуса. Кроме пылесоса для генератора необходим электромотор с высоким числом оборотов (например, от вентилятора) и диск из жести или плотного картона диаметром 30—50 см. В диске пробивают ряд отверстий, идущих равномерно по окружности, и закрепляют его на оси мотора. Поднося наконечник к отверстиям вращающегося диска, вы услышите звук определенной частоты $\nu = nk$, где n — число оборотов мотора в 1 с, k — число дырок в диске. Пока сконструированное устройство — простая дисковая сирена, которую изобрел Томас Иоганн Зеебек, немецкий физик, прославившийся открытием (1821) термоэлектричества.

Теперь можно приступить к усовершенствованию генератора.

Если поставить мотор, у которого регулируется число оборотов, то будут получаться звуки разной частоты. Для этой же цели можно на концентрических окружностях диска пробить различное число отверстий и смещать наконечник вдоль радиуса.

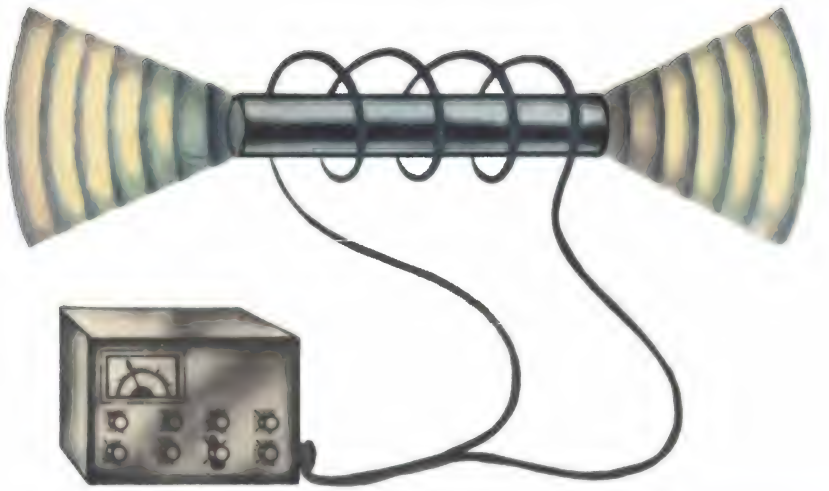
Если сделать восемь рядов отверстий с числом дырок 48, 45, 40, 36, 32, 27 и 24, то вы получите тоны обыкновенной музыкальной гаммы. При четырех рядах с числом дырок 48, 36, 15, 12 под струей воздуха прозвучит мажорный аккорд.

Наконец, можно использовать такие насадки на шланге пылесоса, которые имеют два и более отверстий, так что на различные ряды дырок струи будут направлены одновременно. При опытах надо помнить, что

1) вращающимся диском можно поранить руку;

2) пылесос может перегреваться;

3) опыты не должны мешать работе и отдыху окружающих.



Магнитострикционный эффект. Если к ферромагнитному стержню приложить переменное магнитное поле, он, подобно пьезоэлектрической пластинке, будет вибрировать, возбуждая в среде ультразвуковые волны.

Ультразвуковой ветер (выглядит как фонтан на границе двух жидкостей с разной плотностью).

гом слышимости. Для разных людей порог слышимости неодинаков: как правило, с возрастом он увеличивается. Кроме того, человеческое ухо неодинаково восприимчиво к звукам разной частоты. Наиболее чувствительно оно к частотам от 1000 до 4000 Гц. При очень большой интенсивности во́лны перестают восприниматься как звук, вызывая в ушах ощущение давящей боли. Величину интенсивности звуковых волн, при которой это происходит, называют порогом болевого ощущения.

Слушая радио или магнитофон, интенсивность звука мы обычно оцениваем по громкости. Но количественно это не одно и то же. Субъективно оцениваемая громкость возрастает гораздо медленнее действительной интенсивности звука. При росте интенсивности в геометрической прогрессии громкость возрастает приблизительно в арифметической прогрессии. Поэтому уровень громкости звука определяют как логарифм отношения интенсивности данного звука к интенсивности принятой за единичную, исходную. Громкость звука измеряют в белах или в единицах, на порядок меньших, — децибелах. Энергия, которую переносят обычно звуковые волны, очень мала. Подсчитано, например, что если бы стакан с водой полностью поглощал всю падающую на него энергию звуковой волны с уровнем громкости в 70 децибел (уровень громкой речи) и был бы полностью теплоизолирован от окружающей среды (что, конечно, не совместимо с его облучением звуковыми волнами), то для того, чтобы нагреть воду от комнатной температуры до кипения, потребуется время порядка тридцати тысяч лет.

Важны в учении о звуке также понятия тона и тембра звука. Всякий реальный звук, будь то голос человека или игра музыкального инструмента, — это не простое гармоническое колебание, а своеобразная смесь многих гармонических колебаний с определенным набором частот. То из них, которое имеет наи-

более низкую частоту, называют основным тоном, другие — обертонами. Разное количество обертонов, присущих тому или иному звуку, придает ему особую окраску — тембр. Отличие одного тембра от другого обусловлено не только числом, но и интенсивностью обертонов, сопровождающих звучание основного тона. По тембру мы легко отличаем звуки скрипки и рояля, гитары и флейты, узнаем голоса знакомых людей.

И

ИЗОТОПЫ

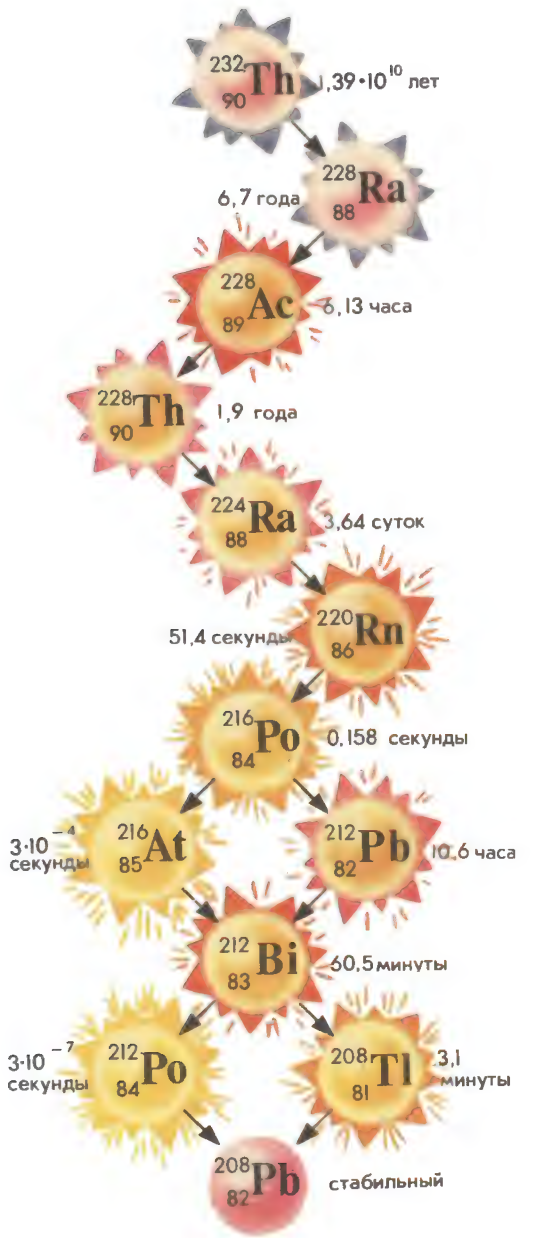
В ходе изучения *радиоактивности* учеными было открыто около 40 природных радиоактивных веществ. Они были объединены в радиоактивные семейства, родоначальниками которых являются изотопы тория и урана (см. рис.). Среди таких веществ некоторые имели идентичные химические свойства, хотя и отличались по *массе*. В 1913 г. английский ученый Ф. Содди назвал их *изотопами;* этот термин производится от греческих слов, означающих «одинаковый» и «место», и подчеркивает, что речь идет о разновидностях *атомов* данного элемента, которые должны занимать одно и то же место в *периодической системе.*

А вскоре английскому физику Ф. Астону, проводившему исследования с помощью метода *масс-спектрометрии,* удалось доказать, что и многие стабильные химические элементы имеют изотопы.

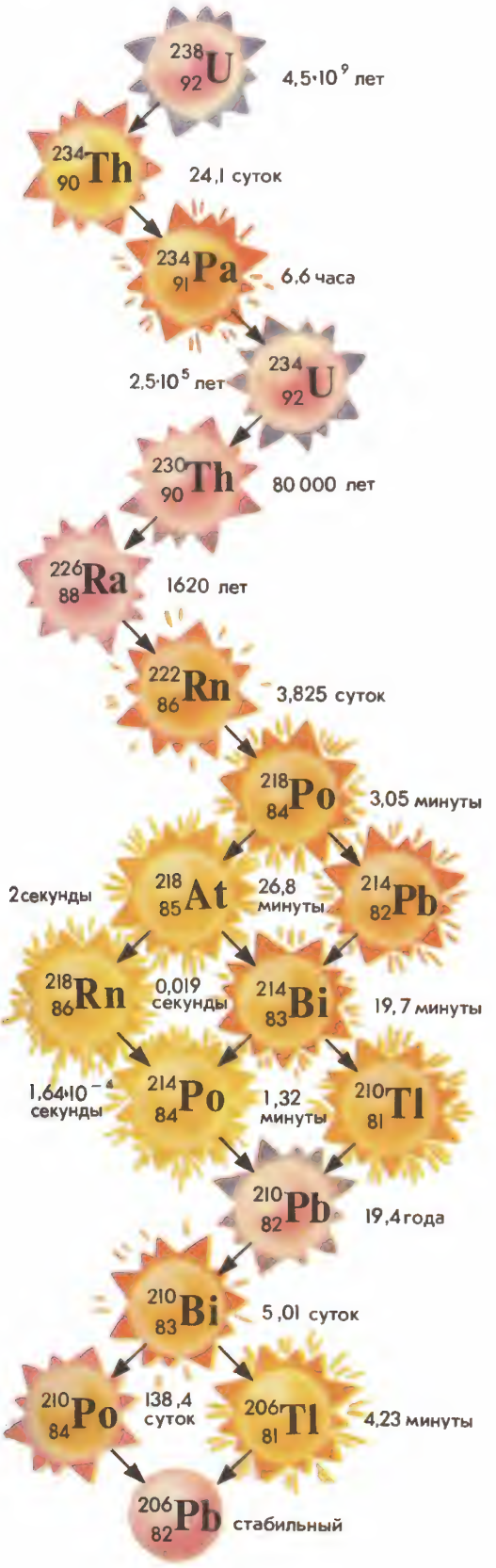
Изотопы — разновидности атомов химического элемента с данным значением Z (числом *протонов* в ядрах), отличающиеся числами *нейтронов* N в ядрах. Например, в ядрах природных изотопов кислорода ($Z = 8$) содержатся соответственно 8, 9 и 10 нейтронов. Сумма чисел протонов и нейтронов в ядре изотопа ($Z + N$) называется массовым числом A. Ныне принято такое обозначение изотопов: слева от символа элемента внизу записывается величина Z, вверху — величина A: ${}^{16}_{8}O$, ${}^{17}_{8}O$ и ${}^{18}_{8}O$.

В настоящее время известно более 1900 изотопов 107 химических элементов. Они могут быть подразделены на две группы: природные и искусственно синтезированные. К природным относятся все стабильные разновидности атомов (их примерно 280) и все естественно радиоактивные, входящие в состав радиоактивных семейств (46). Все остальные изотопы получены в результате различных *ядерных реакций.* Среди искусственных радиоизотопов более 150 принадлежат *трансурановым элементам,* не встречающимся на Земле. Пока еще неизвестно общее количество изотопов, которое удастся синтезировать в будущем. Теоретики, правда, считают, что число разновидностей атомов, так или иначе способных к существованию, должно быть порядка 6000 (!)... Подавляющее большинство искусственных радиоизотопов имеют малые периоды полураспада, измеряемые долями секунды или секундами. Хотя известны и некоторые «долгожители», например: ^{236}U — $2{,}4 \cdot 10^7$ лет, ^{92}Nb — $3{,}3 \cdot 10^7$ лет, ^{10}Be — $2{,}5 \cdot 10^6$ лет, ^{26}Al — $0{,}74 \cdot 10^6$ лет. Возможно, они существовали на Земле в ранние периоды ее эволюции. чтобы «дожить» до наших дней, естественный радиоактивный изотоп должен иметь период полураспада не менее $1{,}5 \cdot 10^8$ лет. Радиоактивными, хотя и в очень слабой степени, оказались и некоторые стабильные изотопы (^{40}K, ^{87}Rb, ^{115}In, ^{138}La, ^{147}Sm, ^{176}Lu, ^{187}Re). Продолжитель-

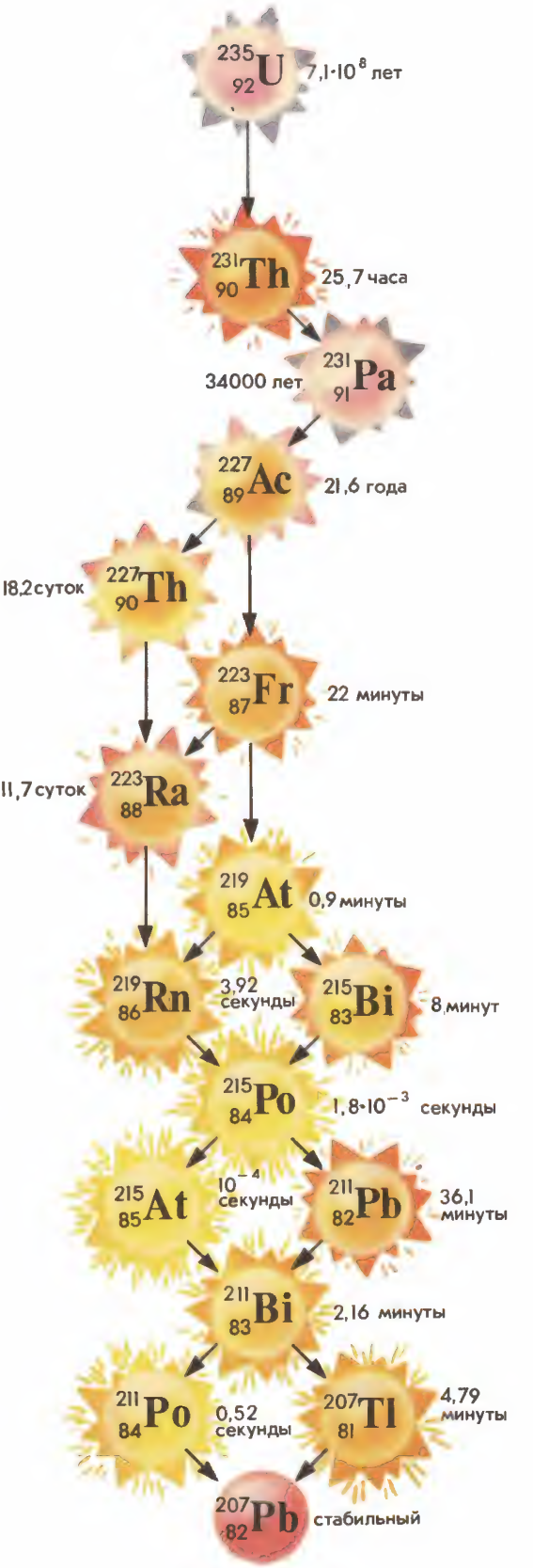
Радиоактивное семейство тория-232.



Радиоактивное семейство урана-238.



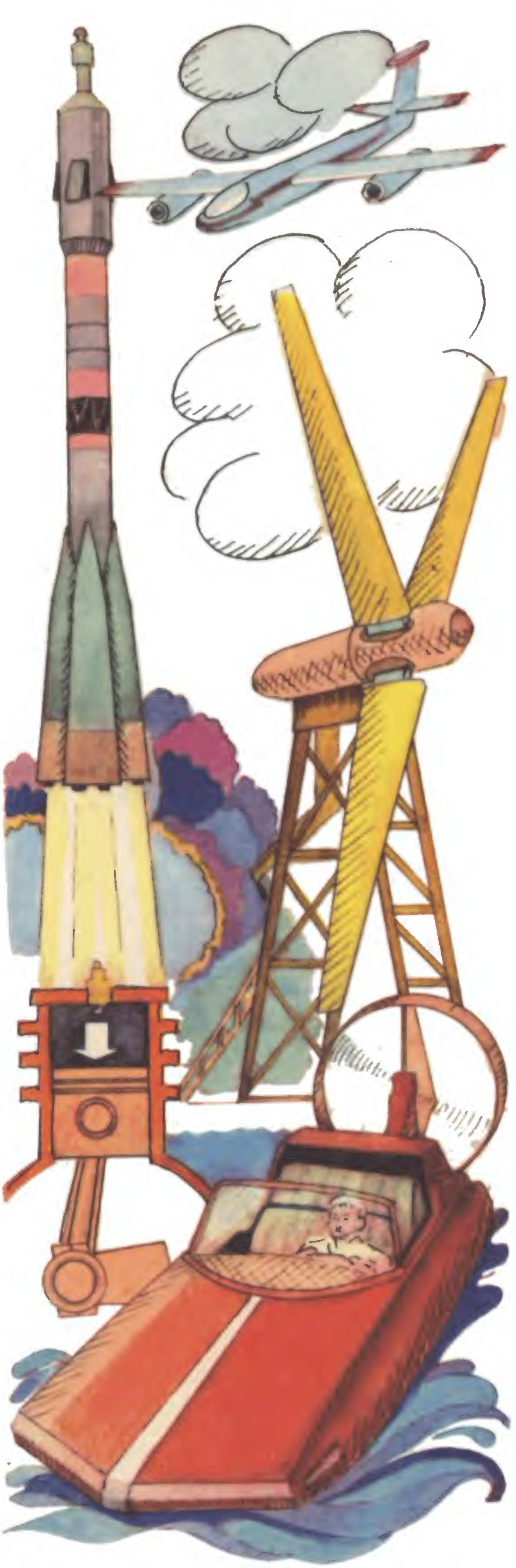
Радиоактивное семейство урана-235.



ность их жизни столь велика, что их можно считать стабильными.

Химические свойства изотопов данного элемента совершенно одинаковы, поскольку идентично строение их электронных оболочек. Поэтому разделение изотопов — чрезвычайно сложная задача. Для ее решения было предложено и развито несколько сложных и дорогостоящих методов, основанных на зависимостях скорости диффузии, траектории движения в магнитном поле и некоторых других физических свойств от массы ядра (см. *Диффузия, Масс-спектрометрия*). Особенно большое различие в физических свойствах наблюдается у таких (сильно отличающихся по массе ядра) изотопов, как водород ${}^{1}_{1}H$, тяжелый водород ${}^{2}_{1}H$ (дейтерий) и «сверхтяжелый» водород ${}^{3}_{1}H$ (тритий), а также гелий — ${}^{4}_{2}He$ и ${}^{3}_{2}He$.

Многим областям науки и техники необходимы изотопы различных элементов в чистом виде. Поэтому разработка эффективных методов разделения изотопов остается актуальной задачей физики и в настоящее время.



ИМПУЛЬС МЕХАНИЧЕСКИЙ

Импульсом, или количеством *движения* тела, называют произведение его *массы* на вектор скорости: $\vec{p} = m\vec{v}$. Это важное физическое понятие непосредственно обобщается и на систему тел как векторная сумма импульсов всех тел, входящих в рассматриваемую систему:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^{N} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{N} m_i \vec{v}_i.$$

Оказывается, что для замкнутой системы (т. е. системы тел, действием внешних сил на которую можно пренебречь) величина полного импульса $\vec{P}$ сохраняется. Закон сохранения импульса играет чрезвычайно важную роль в физике; его происхождение связано с фундаментальным свойством *пространства* — однородностью, т. е. равноправием всех точек пространства (см. *Симметрия законов природы*).

При наличии внешней силы импульс тела или системы тел изменяется со временем, причем изменение импульса $\Delta\vec{p}$ под влиянием силы F за малое время Δt равно: $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$. Это соотношение позволяет представить силу, действующую на тело, в виде $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$. Если за время действия силы масса тела не меняется, то

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta m\vec{v}}{\Delta t} = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = m\vec{a},$$

что совпадает с формулировкой второго закона Ньютона.

Однако найденное соотношение указывает и на другую возможность возникновения силы — это изменение импульса тела за счет изменения его массы. Так, если из ракеты вытекают газы со скоростью $\vec{u}$ и расход массы газа в единицу времени составляют M кг/с, то изменение импульса газов приводит к появлению силы, действующей на ракету со стороны газов:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta (m\vec{u})}{\Delta t} = \vec{u}\frac{\Delta m}{\Delta t} = \vec{u}M.$$

Эта *сила* называется реактивной, а движение под ее действием — реактивным движением.

В 1903 г. русский ученый и изобретатель К. Э. Циолковский опубликовал в Петербурге работу, в которой принцип реактивного движения был положен в основу создания межпланетных кораблей, и доказал, что единственный летательный аппарат, который может проникнуть за пределы земной атмосферы, — это ракета.

Понятие количества движения как произведения массы тела на величину его скорости впервые было введено в физику в XVII в. французским ученым Р. Декартом при изучении им законов механического движения. При формулировке закона сохранения количества движения Декарт определял количество движения как произведение приложенной к нему силы на время ее действия и первым применил название — импульс силы. Но он не рассматривал количество движения как векторную величину, что привело к ошибочности найденных им семи правил соударения тел.

Несколько позже, в конце XVII в., вопрос о том, что же все-таки сохраняется в процессах соударения, вызвал острые споры. Нидерландский ученый Х. Гюйгенс в своей работе о соударении тел пришел к выводу, что сумма произведений «каждого тела» на квадрат его скорости до и после удара остается неизменной. Немецкий ученый Г. Лейбниц в своем труде «Доказательство памятной ошибки Декарта» отрицал закон сохранения количества движения, открытый Декартом. Спор между сторонниками Декарта и Лейбница, продолжавшийся на протяжении тридцати лет, был разрешен в 1728 г. Ж. де Мераном, показавшим, что если рассматривать количество движения как векторную величину, то все становится на свои места: в процессах упругих соударений сохраняются как полный импульс системы тел, вступающих в соударение, так и их полная кинетическая энергия.

Импульсом могут обладать все формы материи, в том числе электромагнитное и гравитационное поля. Для полей вводят вектор плотности импульса, который выражают через физические характеристики этих полей.

ИНЕРЦИЯ

На протяжении тысячелетий люди, глядя на ночное небо, наблюдали движение планет и звезд. Сколько легенд и мифов было о них придумано, однако законы их движения по небосводу оставались загадкой для ученых тех времен. Но вот в 1632 г. во Флоренции вышел в свет труд Г. Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира» (о геоцентрической системе К. Птолемея и гелиоцентрической системе мира Н. Коперника). В нем Галилей заложил основы динамики — принцип *инерции* и классический принцип относительности.

В современной формулировке принцип инерции утверждает, что всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не выводит его из этого состояния.

На первый взгляд это утверждение кажется противоречащим повседневному опыту: вагон, двигающийся по инерции на горизонтальном участке пути, или шайба на ледяном поле неиз-

Рис. 1. Ускоренное движение тела вниз по наклонной плоскости; замедленное движение тела вверх по наклонной плоскости; равномерное прямолинейное движение тела по горизонтальной плоскости.

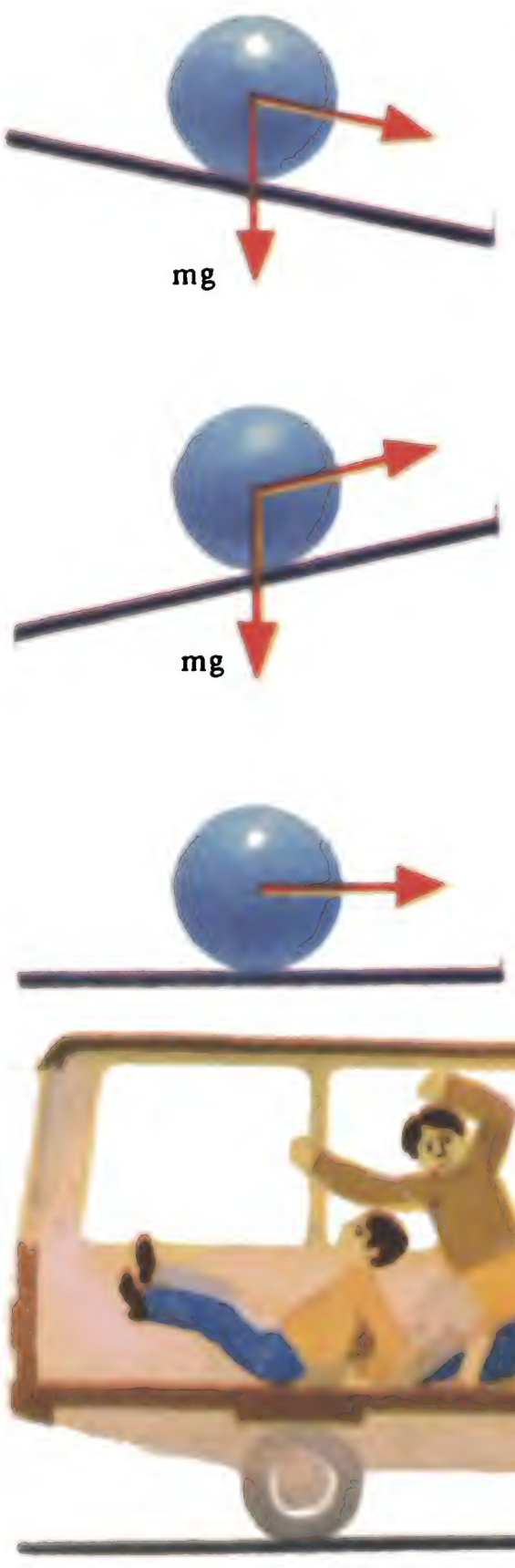
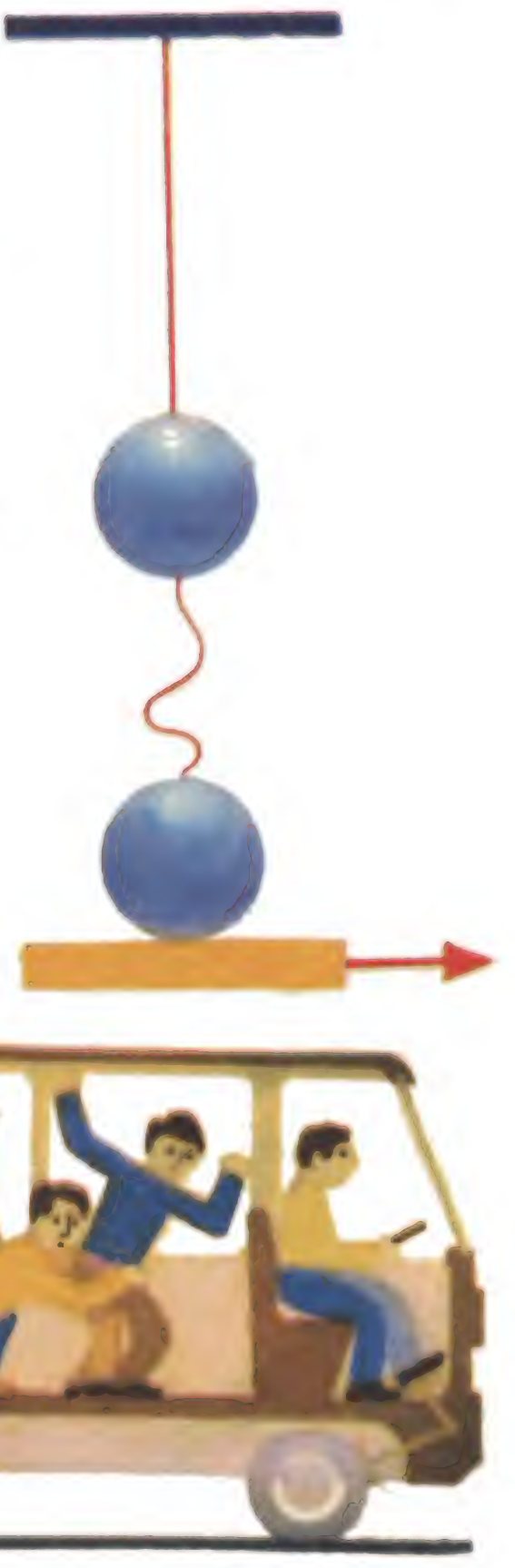


Рис. 2. Свойство инерции тел демонстрирует опыт с двумя грузами, подвешенными на одинаковых нитях один над другим.



менно останавливаются, с какой бы скоростью они ни двигались вначале. Однако ни вагон, ни шайба на самом деле ни на мгновение в процессе своего движения не предоставлены сами себе — на них действуют силы сопротивления.

В «Диалоге» Галилей устанавливает принцип инерции с помощью рассуждения, подобного математическому методу доказательства «от противного». Наклон плоскости к горизонтали является причиной ускоренного движения тела, движущегося вниз, и замедленного движения тела, движущегося вверх по наклонной плоскости. Поэтому при движении по неограниченной горизонтальной плоскости у тела нет причин ускоряться или замедляться, и оно пребывает в состоянии равномерного прямолинейного движения или покоя (рис. 1).

В 1687 г. И. Ньютон сформулировал законы динамики. Стали понятными и поддающимися расчету не только движение планет вокруг Солнца, но и гораздо более сложные явления. В качестве первого закона динамики И. Ньютон принял галилеев принцип инерции. Галилей сформулировал этот принцип в виде следствия из проведенных им опытов при изучении падения тел по наклонной плоскости. Он не различал понятий «сила» и «вес», поэтому установленный им принцип инерции не

претендовал на фундаментальный закон природы. Ньютон же поставил этот закон во главу всей своей системы *механики*.

Во втором законе Ньютон идет дальше — рассматривая движение тела под воздействием других тел, он связывает изменение скорости тела с *силой* — мерой этого воздействия. В данном законе свойство инерции тел проявляется в том, что изменение состояния покоя тела под воздействием силы происходит постепенно, а не мгновенно. При этом скорость движения изменяется тем медленнее, чем больше инерция тела, мерой которой является его *масса*.

Инерция мешает нам сдвинуть вагон с места. Она может помешать своевременно остановить быстро движущийся автомобиль. Чтобы «погасить инерцию» при посадке реактивного самолета, часто применяют специальные парашюты. Не надо, однако, считать инерцию злом. Если бы вдруг не стало инерции, то перестал бы существовать весь наш мир, в нем исчезли бы причинные связи и прошлое не влияло бы на настоящее, а настоящее на будущее. В мире без инерции невозможно кататься на коньках, бегать и даже ходить. С исчезновением инерции прекратилось бы движение небесных тел, Луна упала бы на Землю, а Земля (как и другие планеты) упала бы на Солнце.

Рассмотрим свойство инерции на опыте. Два тяжелых груза подвешиваются на одинаковых нитях один над другим (рис. 2). Нить подбирается так, чтобы она выдерживала натяжение, равное весу одного груза, и обрывалась при натяжении, равном весу обоих грузов. Тогда если плавно опустить сначала верхний груз, поддерживая нижний, а затем плавно же опустить нижний груз, то верхняя нить оборвется. Если же опустить нижний груз не плавно, а сразу, выдернув из-под него подставку, то оборвется не верхняя, а нижняя нить.

Рассмотренный опыт нетрудно объяснить, если принять во внимание, что, во-первых, нить

действует с определенной силой на груз, только когда она растянута, и во-вторых, обрывается нить тогда, когда ее удлинение превосходит допустимое.

Теперь понятно, почему, когда нижний груз падает с некоторой высоты, обрывается не верхняя, а нижняя нить: дело в том, что верхний груз не может «сразу» приобрести заметную скорость, а нижний — не может «сразу» потерять свою скорость, потому что груз обладает инерцией.

Рис. 1. Получение фигуры Хладни (на пластинку насыпали песок и провели по ее краю смычком).

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Принцип интерференции был открыт в 1802 г., когда англичанин Т. Юнг, врач по профессии, человек с очень разносторонними интересами, провел ставший теперь классическим «опыт с двумя отверстиями». В экране кончиком булавки прокалывались две близко расположенные дырочки, которые освещались солнечным светом из небольшого отверстия в зашторенном окне. За экраном Юнг наблюдал вместо двух ярких точек серию чередующихся темных и светлых колец.

Свой опыт он объяснил по аналогии с распространением двух разных систем волн на поверхности воды.

«Я полагаю,— писал Юнг,— что подобные явления имеют место, когда смешиваются две порции света, и это наложение я называю общим законом интерференции».

Рассмотрим подробнее явление интерференции.

Картина, возникающая в результате сложения волн, существенно зависит от свойств их источников. Пусть, например, распространяются две волны одинаковой частоты. Кроме того, для простоты будем считать, что амплитуды волн одинаковые. Колебания в любой точке пространства определяются суммой колебаний в каждой волне, происходящих, вообще говоря, с разными фазами (см. *Волна*):

$$a = a_0 \cos(\omega t + \delta_1) + a_0 \cos(\omega t + \delta_2). \quad (1)$$

Используя известную формулу для суммы косинусов, это выражение легко преобразовать в следующее:

$$a = a_{сум} \cos\left(\omega t + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}\right),$$

$$a_{сум} = 2a_0 \cos\frac{\delta_1 - \delta_2}{2}. \quad (2)$$

Формула (2) описывает гармоническое колебание, происходящее с той же самой частотой ω, но амплитуда колебаний $a_{сум}$ зависит от разности фаз складываемых колебаний.

Интенсивность колебания определяется квадратом амплитуды (энергия колебания пропорциональна квадрату скорости, а следовательно, и квадрату амплитуды — см. *Колебания*). Поэтому для интенсивности результирующего колебания получаем:

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ЗАПЫЛЕННОМ ЗЕРКАЛЕ

Если перед запыленным зеркалом зажечь свечу или фонарик, можно увидеть вокруг пламени (лампочки) радужную каемку. Она возникает из-за интерференции света, отраженного зеркалом, покрытым хаотически расположенными частицами пыли. Эти частицы образуют «дифракционную решетку». Такое явление сходно с появлением «венцов» — цветных концентрических окружностей, которые иногда окружают солнце или луну. Здесь роль пыли играют водяные капли в атмосфере. Чтобы получить «постоянно действующее пыльное зеркало», нужно взять кусочек чистого стекла, например отмытую фотопластинку, нанести на него тонкий слой вазелина и равномерно посыпать порошком ликоподия (споры растения).

Наложив сверху такую же пластинку, посмотрите сквозь них на пламя свечи. Оно будет окружено цветной каймой из нескольких ободков.

Внутри каждого ободка — синий цвет, снаружи — красный.

ДИФРАКЦИЯ НА ЩЕЛИ

Возьмите кусочек алюминиевой фольги и сделайте в нем бритвой разрез. Длина разреза должна составлять 3—5 см. Если посмотреть одним глазом сквозь щель на матовую лампочку, держа фольгу недалеко от лица, то в щели будут видны темные вертикальные полосы. Четкая — в центре и ряд боковых, более слабых.

Похожий опыт можно поставить и вообще без всяких приспособлений — сжимая большой и указательный пальцы. Когда расстояние между ними станет совсем малым, вы увидите, как в щели возникает черная полоска.

$$a^2_{\text{сум}} = 2a_0^2 + 2a_0^2 \cos(\delta_1 - \delta_2). \quad (3)$$

Это очень важная формула. Она показывает, что при сложении волн не всегда складываются интенсивности. Суммарная интенсивность может быть как больше, так и меньше $2a_0^2$ (в зависимости от величины разности фаз $\delta_1 - \delta_2$, определяющей знак косинуса). Это и есть интерференция.

Необходимое условие интерференции — постоянство разности фаз $\delta_1 - \delta_2$ в каждой точке пространства. Если эта величина меняется со временем случайным образом, то при усреднении $\cos(\delta_1 - \delta_2)$ получается нуль и интенсивности колебаний складываются. Именно поэтому нельзя наблюдать интерференцию света от обычных лампочек. Атомы в раскаленной нити испускают «обрывки» световых волн (цуги), в которых фазы колебаний случайные. При использовании обычных источников света справедлив закон сложения освещенностей (интенсивностей).

Другое дело — *лазер*. В нем атомы испускают свет согласованно, и такой свет при излучении характеризуется определенной фазой, т. е. является когерентным. Если скрестить два лазерных луча, например, на экране, то в каждом месте экрана разность фаз колебаний будет во времени постоянной. Однако величина разности фаз зависит от длины путей, которые проходят световые лучи от источников до точки экрана. В зависимости от точки она может меняться от 0 до 2π. Соответственно, из формулы (3) мы видим, что интенсивность колебаний может меняться от 0 до $4a_0^2$. Некоторые места экрана будут вдвое ярче, чем при обычном сложении освещенностей, но зато в других местах будет темнота (*закон сохранения энергии* при этом, разумеется, не нарушается, т. е. энергия просто перераспределяется по экрану).

Итак, для наблюдения явления интерференции нужны когерентные источники, излучающие волны с фиксированной разностью фаз. Такие источники научились делать еще до изобретения лазеров. Идея состоит в расщеплении луча света от обычного источника (например, с помощью полупрозрачного зеркала). Затем образующиеся таким образом два луча, используя оптические системы, направляют на экран. Поскольку оба луча имеют одинаковое происхождение, то разность фаз в каждом месте экрана оказывается фиксированной (она зависит только от разности длин оптических путей). На экране возникает устойчивая интерференционная картина.

Типичный пример интерференционного явления, который можно наблюдать, — это цветовая окраска тонких пленок (пятна бензина на асфальте, мыльные пленки). В таком случае происходит интерференция лучей, отраженных от внешней и внутренней поверхности пленки. Если толщина пленки равна, например, половине длины волны света, то разность хода лучей равна длине волны (луч, отраженный от внутренней поверхности, проходит пленку 2 раза — туда и обратно). Соответственно разность фаз равна 2π, и лучи максимально усиливают друг друга. Таким образом, для данной толщины пленки существует определенная длина волны, при которой отраженный луч наиболее яркий. Толщина пленки обычно меняется от места к месту, и она кажется окрашенной во все цвета радуги.

Интересно, что этой проблемой занимался Ньютон, и, поскольку он придерживался мне-

ДОЛГОИГРАЮЩАЯ ПЛАСТИНКА ВМЕСТО ПРИЗМЫ

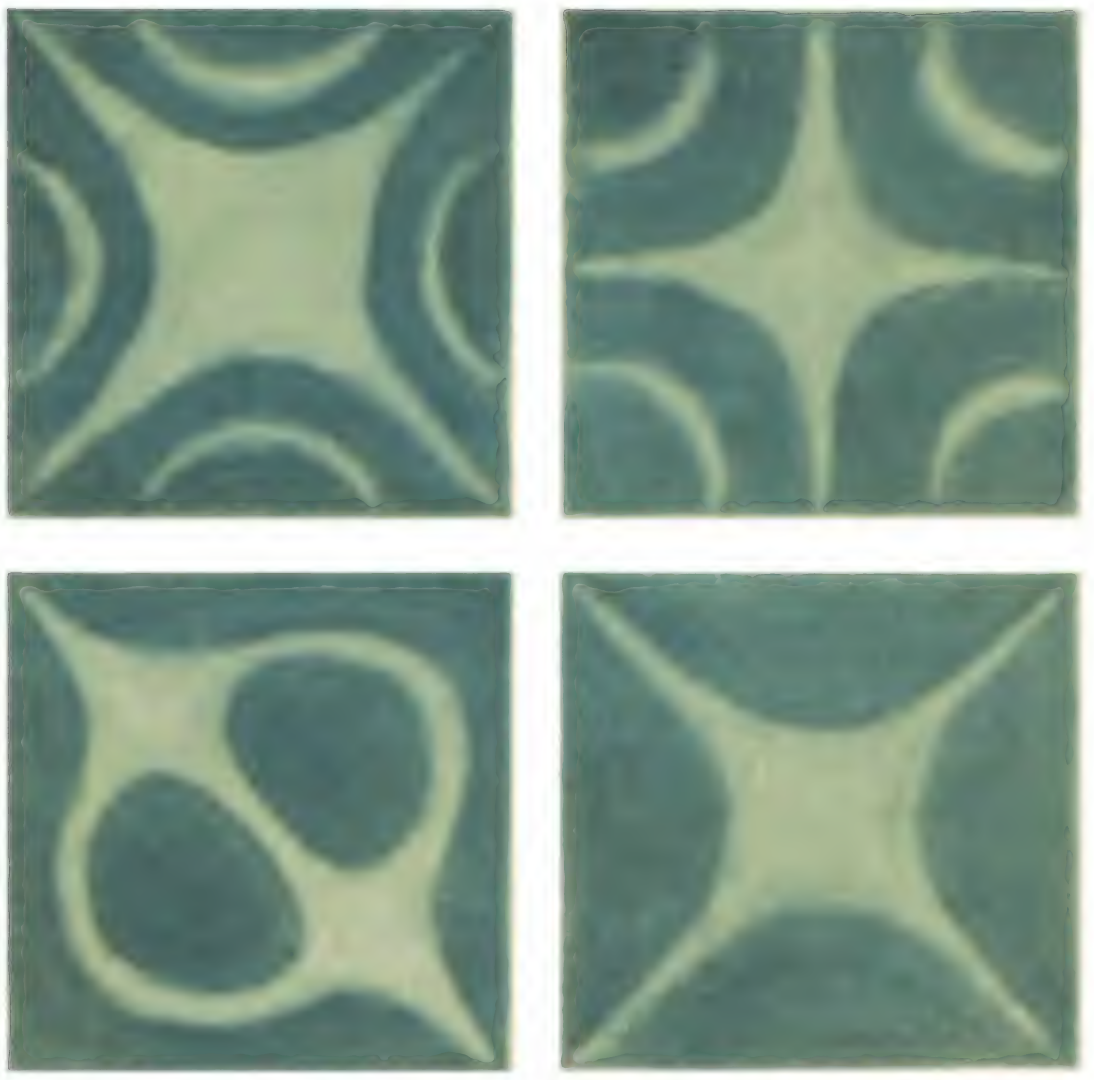
Теперь от опытов с одной щелью перейдем к экспериментам, в которых наблюдается картина интерференции от многих щелей. Такое устройство со множеством щелей называется дифракционной решеткой. Как самостоятельно изготовить решетку, будет рассказано дальше. Сначала воспользуемся «подручными средствами». Грубым приближением дифракционной решетки может служить долгоиграющая пластинка с бороздками, нанесенными приблизительно на расстоянии $d \simeq 0{,}1$ мм друг от друга. Для того чтобы приблизить эффективное значение периода решетки d' к величине λ света, надо сделать так, чтобы луч света падал на пластинку под малым углом. Тогда, рассматривая глазом изображение луча или поставив на пути света экран, можно будет увидеть цветные полосы, окрашенные всеми цветами радуги.

КАК СДЕЛАТЬ ДИФРАКЦИОННУЮ РЕШЕТКУ

Самостоятельно ее изготовить лучше всего фотоспособом. На большой лист ватмана нанести черной тушью параллельные линии шириной 2—3 мм на расстоянии 2—3 мм друг от друга. Затем надо сфотографировать этот лист при ярком и равномерном освещении на расстоянии 5—6 м.

После проявления негатив может служить дифракционной решеткой. Она будет содержать несколько десятков штрихов на 1 мм, что вполне достаточно для первых экспериментов. Для ее проверки воспользуйтесь диапроектором. Поставьте вместо диапозитива фольгу со щелью и сфокусируйте изображение щели на экран. Поднеся к объективу нашу решетку, вы увидите по сторонам щели две полосы с цветами радуги. Перемещая решетку в сторону экрана, можно видеть спектры второго и третьего порядков.

Рис. 2. Фигуры Хладни.



ния, что свет состоит из мельчайших частиц (корпускул), ему пришлось для объяснения окрашивания тонких пластин приписать этим частицам странные «приступы» легкого и тяжелого отражения. А вот Юнг на основе интерференции легко объяснил это явление и даже впервые измерил длину волны света, и с очень хорошей точностью.

Особый вид интерференционной картины возникает при сложении прямой и отраженной волн. При этом образуются так называемые с т о я ч и е в о л н ы.

В простейшем случае при отражении плоской волны от плоской стенки возникает система неподвижных максимумов и минимумов, расположенных параллельно стенке. При отражении под углом картина усложняется. Еще один пример — так называемые фигуры Хладни (рис 2). На пластинку, закрепленную в одной точке, насыпают песок, а по ее краю проводят смычком. Песок собирается на определенных линиях, вид которых зависит от формы пластинки и положения закрепленной точки (рис. 1).

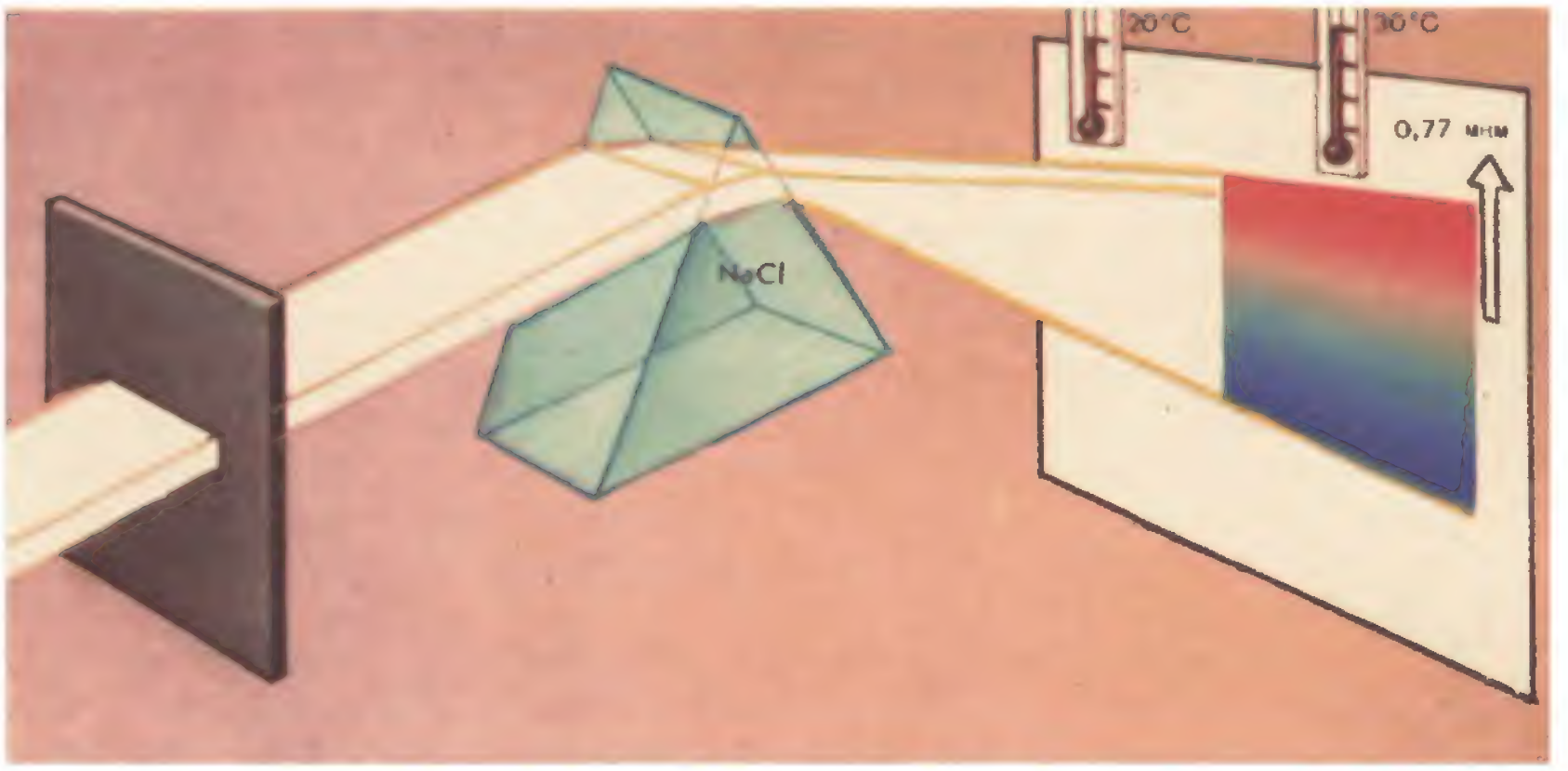
В этом случае звуковые волны, возбуждаемые в пластинке смычком, отражаются от ее краев (не случайно объяснение эхо также принадлежит Хладни). В каждом месте пластины происходит сложение колебаний с разными сдвигами фаз. В результате возникают узловые точки — там, где колебания гасят друг друга, и пучности — там, где они максимально усиливаются. Песок сбрасывается с пучностей и собирается на узловых линиях. Теорию этих фигур, обнаруженных знаменитым немецким акустиком Хладни в 1787 г., создали французские ученые Лаплас и Пуассон.

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Если пропустить луч солнечного света сквозь призму из оптического стекла, каменной соли или другого прозрачного материала, то на экране возникнет цветная полоса — с п е к т р. Энергия в спектре убывает при приближении к его синей и красной границам. Но даже в темном участке спектра на экран падает лучистая энергия. В этом можно убедиться, поместив там термометр. Энергию, падающую на участок за красной границей, переносит не воспринимаемое глазом инфракрасное (ИК) излучение — *электромагнитные волны*, длины которых заключены в диапазоне от 0,740 примерно до 1 мкм.

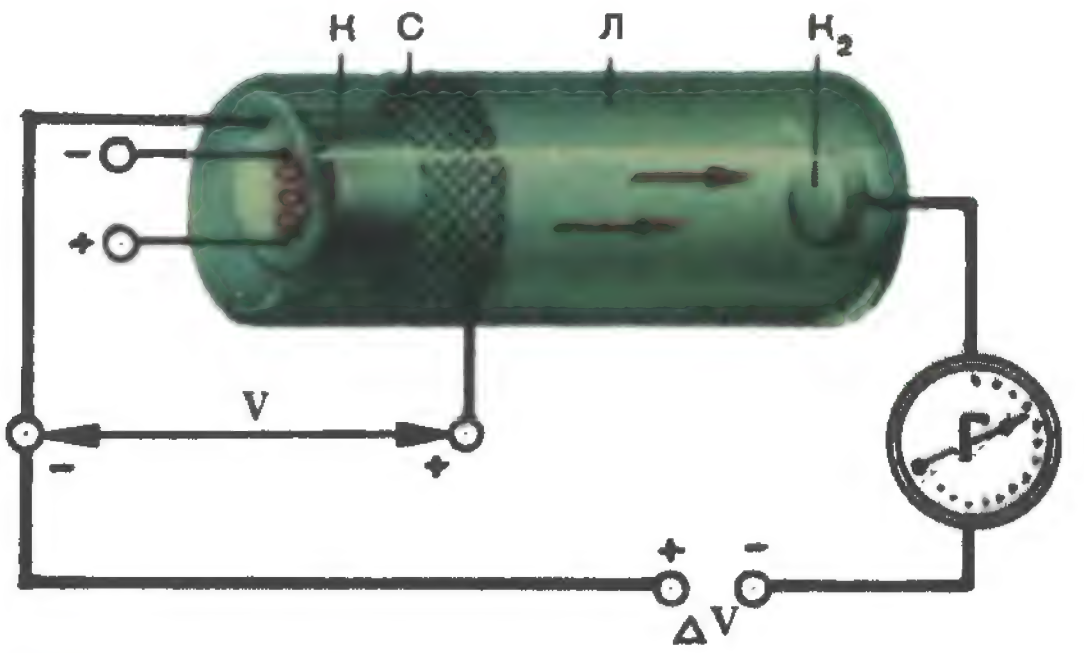
Нагретые тела — главный источник ИК-излучения. Закон смещения Вина гласит: максимум излучения тела, нагретого до температуры T ° К, падает на длину волны $\lambda = \frac{2897}{T}$ мкм. Получается, что максимум излучения человеческого тела приходится на длину волны $\lambda = 9{,}37$ мкм, а тающего льда — на $\lambda = 10{,}6$ мкм.

Ученые разработали приборы, преобразующие инфракрасное излучение в видимый свет. С их помощью создана аппаратура ночного видения; можно снять карту температуры человеческого тела и по ней судить о здоровье



Призма из каменной соли пропускает без поглощения инфракрасное излучение до $\lambda = 13{,}5$ мкм. За красной границей спектра на экран падает значительная мощность излучения. Термометр в полосе спектра показывает повышение температуры.

человека. Спектры в инфракрасной области излучения помогают исследователям понять строение сложных органических молекул. Мощные потоки излучения инфракрасных ламп используются во многих технологических процессах, например: для быстрой сушки окрашенных автомобильных кузовов, обогрева молодняка сельскохозяйственных животных на фермах и т. п.



Прибор для измерения потенциала ионизации газов. *Л* — объем с газом; *К* — катод; $К_2$ — коллектор; *V* — напряжение, ускоряющее электроны, испускаемые катодом; ΔV — разность потенциалов между катодом и коллектором.

ИОНИЗАЦИЯ

Ионизация — процесс отделения *электронов* от нейтрального *атома* или *молекулы* — возможна при затрате энергии на преодоление притяжения между вырываемым электроном и остальной частью атома. Эту энергию называют работой ионизации *A*. Если ионы образуются после столкновения быстрого электрона с атомом, то такая *ионизация* называется ударной.

Наименьшее значение кинетической энергии электронов, при которой происходит ионизация, чуть больше работы ионизации A_i: $A_i = \frac{mv^2}{2}\left(\frac{1}{1+\frac{m}{M}}\right)$. Отношение масс электрона и атома всегда малая величина, например для атома водорода $\frac{m}{M} = 5{,}443 \cdot 10^{-4}$, и величина, стоящая в скобках, близка к единице. Разность потенциалов, при прохождении которой электрон или другая частица с таким же зарядом приобретает кинетическую энергию, равную работе ионизации, называют потенциалом ионизации: V_i: $V_i = A_i/e$.

Наиболее точный способ определения потенциала ионизации состоит в измерении энергий переходов атомов при изучении их линейчатых спектров. Наиболее наглядный способ — это измерение потенциала между катодом *К* и сеткой *С* газоразрядной трубки *Л* (см. рис.). Если давление в трубке невелико, то электроны, испущенные накаленным катодом, в промежутке *К* — *С* не сталкиваются с молекулами газа. При этих условиях энергия электронов, прошедших сквозь сетку, будет равна V_e. Такие электроны не смогут достигнуть коллектора $К_2$, поскольку его потенциал меньше V_e на величину ΔV. В результате ток в гальванометре *Г* будет равен нулю. При увеличении *V* до значений $V \geqslant V_{min}$ в цепи гальванометра появится ток: в объеме *С* — $К_2$ образуются положительные ионы, которые притягиваются сборником $К_2$. Значение V_{min}, при котором начинает появляться ток, зависит только от рода газа. Так, при наполнении трубки гелием ток начинает течь, когда V_{min} достигает 24,58 В. Если

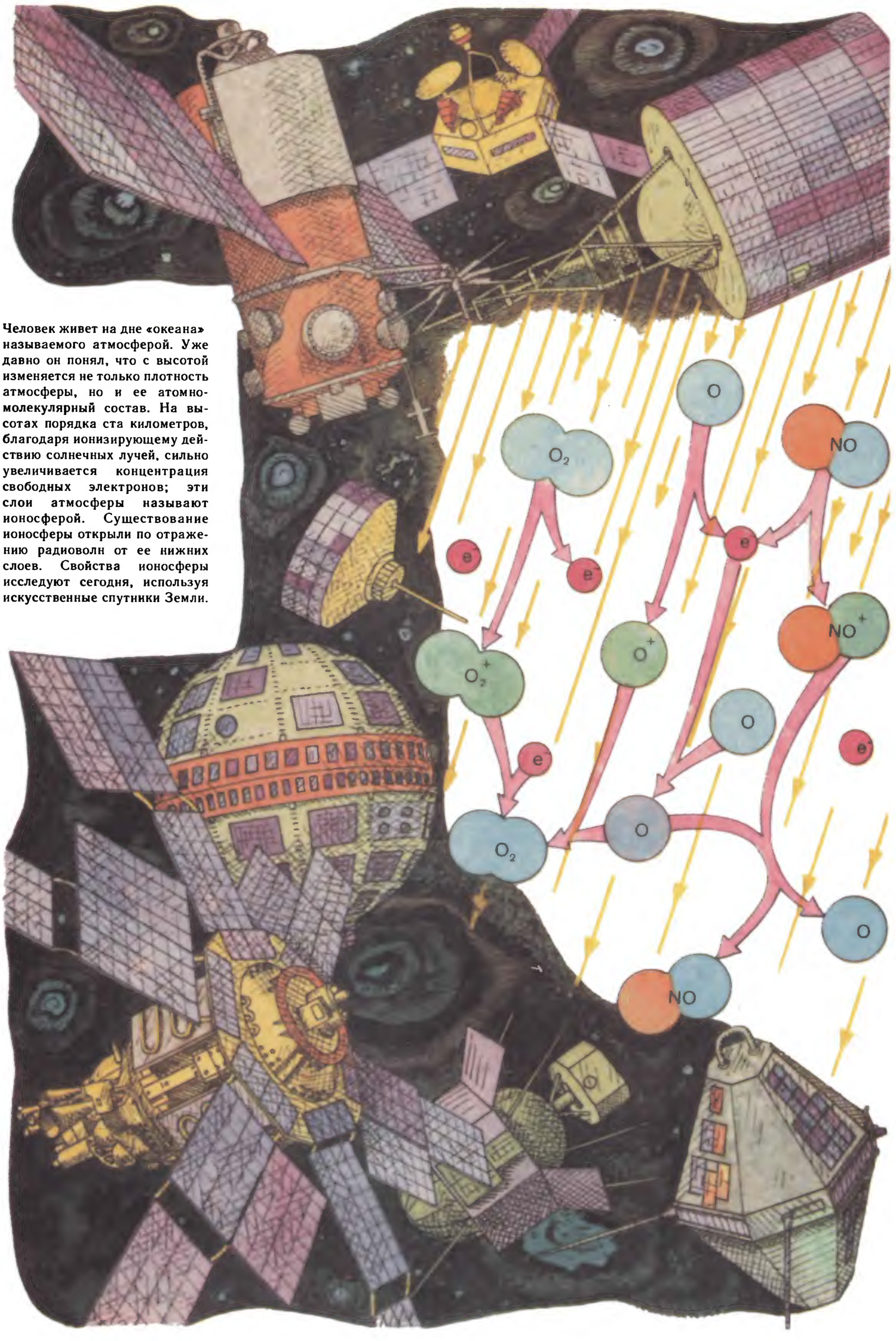
Утечка электроскопа под действием пламени свечи.

гелий заменить аргоном, ток появится при $V_{min} = 15{,}76$ В. Эти величины и есть потенциалы ионизации гелия и аргона.

Ионизация электронным ударом — один из многих способов получения ионов. В газе, нагретом до высокой температуры, например в солнечной короне, атомы ионизируются, сталкиваясь между собой. Много ионов и в обычном пламени. Так, горящая свеча разряжает электроскоп.

Кванты электромагнитного излучения выбивают из атомов электроны, если обладают достаточной энергией. Такой процесс называют фотоионизацией. *Рентгеновские лучи*, γ-кванты (см. *Гамма-излучение*) оставляют в газах следы из ионизированных атомов.

В газе, нагретом до высокой температуры, атомы движутся с большой скоростью и, сталкиваясь друг с другом, теряют электроны. Этот вид ионизации газа — термическая ионизация. Если температура вещества достигает многих миллиардов градусов, атомы теряют все электроны, и образуется смесь атомных ядер и электронов — высокотемпературная *плазма*. Атомы, потерявшие несколько электронов, называют многозарядными ионами. В солнечном излучении было открыто несколько спектров, не совпадающих ни с одним спектром нового элемента. Казалось, что обнаружена целая группа еще не открытых элементов. Однако вскоре выяснилось, что необычные спектры принадлежат многозарядным ионам обычных элементов и только гелий — новый элемент, впервые обнаруженный на Солнце по его спектру.



Человек живет на дне «океана» называемого атмосферой. Уже давно он понял, что с высотой изменяется не только плотность атмосферы, но и ее атомно-молекулярный состав. На высотах порядка ста километров, благодаря ионизирующему действию солнечных лучей, сильно увеличивается концентрация свободных электронов; эти слои атмосферы называют ионосферой. Существование ионосферы открыли по отражению радиоволн от ее нижних слоев. Свойства ионосферы исследуют сегодня, используя искусственные спутники Земли.

ИОНОСФЕРА

Плотность атмосферных газов быстро убывает с высотой (см. *Атмосфера*). В то же время с подъемом становится интенсивнее ультрафиолетовая часть солнечного спектра. Это коротковолновое излучение способно ионизовать *атомы* и *молекулы*. Образующиеся при этом *электроны* и ионы начинают двигаться независимо. Конечно, в среднем разноименные заряды притягиваются друг к другу и рекомбинируют, т. е. воссоединяются (см. рис.). Однако при малой концентрации ионов им требуется большое время, чтобы встретиться с ионом противоположного знака или с электроном. За это время (часы и даже сутки) солнечное излучение успевает образовать много новых ионов. В результате на каждой высоте создается некоторая концентрация электронов и ионов. Она, разумеется, зависит и от времени суток, ведь ночью ионы только рекомбинируют.

С удалением от земной поверхности концентрация электронов сперва возрастает (увеличивается ионизирующее воздействие солнечного света), а на больших высотах падает (поскольку общая плотность атмосферы убы-

вает). Так возникает область повышенной электронной концентрации, а следовательно, и ионной — в целом среда остается электронейтральной. Ее и называют *ионосферой*.

Ионосфера, по-видимому, характерна для атмосфер большинства планет, по крайней мере она была обнаружена и у Венеры, и у Марса, и у Юпитера. Ионосфера Земли состоит из нескольких с л о е в. Нижний слой обозначается буквой *D*; днем он располагается на высоте 90 км, а ночью исчезает. Слой *E* на высоте 110 км остается и ночью, но концентрация электронов в нем в ночное время уменьшается более чем в 20 раз. Наконец, на высотах в 200 и 300 км располагаются слои F_1 и F_2. В них электронная концентрация самая большая, днем число электронов в 1 $см^3$ достигает двух миллионов.

Существование ионосферы было обнаружено еще в те времена, когда не существовало высотных ракет и не было возможности непосредственно измерить концентрацию ионов. Ионосфера была открыта по отражению от нее радиоволн. В 1895 г. русский физик и изобретатель А. С. Попов передал первую в мире радиограмму. В 1901 г. была осуществлена радиопередача через Атлантический океан. Она оказалась возможной потому, что радиоволны отражаются от слоя повышенной плотности электронов и огибают Землю, не уходя в космическое пространство.

Отражение радиоволн существенно зависит от их частоты или от длины волны. А именно от слоя с электронной концентрацией n_e, выраженной в $см^{-3}$, отражаются *электромагнитные волны* с длинами, большими $33\,000\ м/\sqrt{n_e}$. Подставим в эту формулу $n_e = 2 \cdot 10^6 см^{-3}$, характерную для слоя F_2. Отсюда следует, что устойчивая радиопередача на большие расстояния возможна на длинах волн, больших 25 м. Посмотрите теперь на шкалу радиоприемника: диапазон коротких волн начинается именно с этой длины волны или с соответствующей ей частоты 12 мГц.

Более короткие радиоволны (метровые и дециметровые) используются для телевидения и УКВ-радиовещания. Их прием возможен в пределах видимости антенны (телевышки). Еще более короткие, сантиметровые электромагнитные волны используются для связи с космическими аппаратами. Они без препятствий проходят сквозь ионосферу.

ИСПАРЕНИЕ

Испарение — переход вещества из жидкого состояния в газообразное (парообразное). Оно происходит с открытой, свободной поверхности, отделяющей *жидкость* от *газа*, например

Облака на небе, иней на деревьях — это все следствия процессов испарения воды и конденсации водяного пара.

с поверхности открытого сосуда, с поверхности водоема и т. д. Испарение происходит при любой температуре, но для всякой жидкости с повышением температуры скорость его увеличивается. Объем, занимаемый данной массой вещества, при испарении скачком возрастает.

Следует различать два основных случая. Первый, когда испарение происходит в замкнутом сосуде и температура во всех точках сосуда одинакова. Так, например, испаряется вода внутри парового котла или в чайнике, закрытом крышкой, если температура воды и пара ниже температуры *кипения*. В этом случае объем образующегося пара ограничен пространством сосуда. *Давление* пара достигает некоторого предельного значения, при котором он находится в *тепловом равновесии* с жидкостью; такой п а р называется н а с ы щ е н н ы м, а его давление — у п р у г о с т ь ю п а р а. Второй случай, когда пространство над жидкостью незамкнутое; так испаряется вода с поверхности пруда. В этом случае равновесие не достигается практически никогда, и пар ненасыщенный, а скорость испарения зависит от многих факторов.

Мерой скорости испарения является количество вещества, улетающего в единицу времени с единицы свободной поверхности жидкости. Английский физик и химик Д. Дальтон в начале XIX в. нашел, что скорость испарения пропорциональна разности между давлением насыщенного пара при температуре испаряющейся жидкости и действительным давлением того реального пара, который над жидкостью

имеется. Если жидкость и пар находятся в ростом температуры тем сильнее, чем больше равновесии, то скорость испарения равна нулю. теплота испарения.

Точнее, оно происходит, но с той же скоростью происходит и обратный процесс — к о н д е н с а ц и я (переход вещества из газообразного или парообразного состояния в жидкое). Скорость испарения зависит также от того, происходит ли оно в спокойной атмосфере или движущейся; скорость его увеличивается, если образующийся пар сдувается потоком воздуха или откачивается насосом.

Если испарение происходит из жидкого раствора, то разные вещества испаряются с разной скоростью. Скорость испарения данного вещества уменьшается с увеличением давления посторонних газов, например воздуха. Поэтому испарение в пустоту происходит с наибольшей скоростью. Напротив, добавляя в сосуд посторонний, инертный газ, можно очень сильно замедлить испарение.

При испарении вылетающие из жидкости *молекулы* должны преодолеть притяжение соседних молекул и совершить работу против удерживающих их в поверхностном слое сил *поверхностного натяжения*. Поэтому, чтобы испарение происходило, испаряющемуся веществу надо сообщить тепло, черпая его из запаса внутренней энергии самой жидкости или отбирая у окружающих тел. Количество тепла, которое нужно сообщить жидкости, находящейся при данной температуре и фиксированном давлении, чтобы перевести ее в пар при этой же температуре и давлении, называется т е п л о т о й и с п а р е н и я. Упругость пара растет с

Если к испаряющейся жидкости не подводить тепла извне или подводить его недостаточно, то жидкость охлаждается. Вот почему, оставив мокрую руку на воздухе, мы ощущаем холод. Заставляя жидкость, помещенную в сосуд с нетеплопроводными стенками, усиленно испаряться, можно добиться значительного ее охлаждения. Согласно *кинетической теории*, испаряются наиболее быстрые молекулы, средняя энергия остающихся в жидкости молекул убывает — вот почему жидкость охлаждается.

Иногда испарением называют также с у б л и м а ц и ю, и л и в о з г о н к у, т. е. переход твердого вещества в газообразное состояние. Почти все их закономерности действительно похожи. Теплота сублимации больше теплоты испарения приблизительно на теплоту плавления.

При температурах ниже температуры плавления давление насыщенных паров большинства *твердых тел* очень мало, и их испарение практически отсутствует. Бывают, однако, исключения. Так, вода при 0° С имеет давление насыщенных паров 4,58 мм рт. ст., а лед при — 1° С — 4,22 мм и даже при — 10° С — все еще 1,98 мм рт. ст. Этими сравнительно большими упругостями водяного пара объясняется легко наблюдаемое испарение твердого льда, в частности известный всем факт высыхания мокрого белья на морозе.

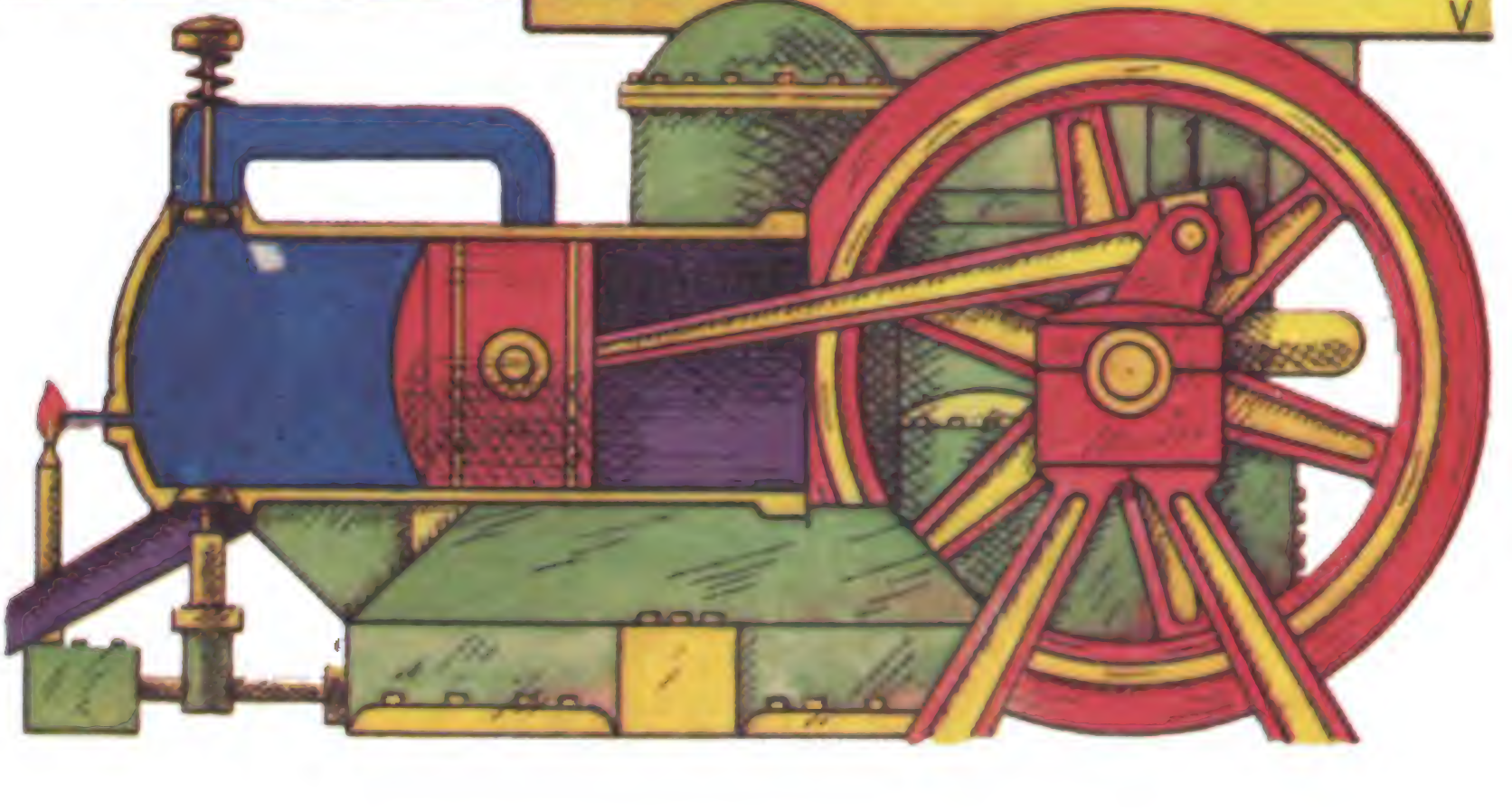
К

КАРНО ЦИКЛ

Развитие *термодинамики* было в большой степени связано с анализом работы тепловых машин. Его осуществил в 1824 г. французский инженер С. Карно в книге «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». Основная идея Карно состоит в том, что тепловая машина производит работу не за счет только поглощения тепла, а благодаря его передаче от источника тепла — нагревателя, находящегося при температуре T_1, к холодильнику, находящемуся при температуре $T_2 < T_1$, т. е. от более нагретого тела к менее нагретому.

С. Карно впервые разработал метод циклов. Цикл — это последовательность процессов, которые возвращают в конечном счете всю систему участвующих в них тел в первоначальное состояние. Метод циклов оказал и продолжает оказывать большое влияние на развитие термодинамики.

Изменение состояния системы обычно характеризуют изменением трех основных пара-



метров: температуры T, давления p и объема V. Для одного моля идеального *газа*, как известно, выполняется уравнение $pV = RT$. Французский физик Б. Клапейрон в 1834 г. впервые предложил изображать на диаграмме с помощью этого уравнения процессы, составляющие цикл. Если по оси ординат такой диаграммы откладывать давление, а по оси абсцисс — объем, то площадь, заключенная внутри замкнутой кривой, характеризующей изменение состояния системы, будет представлять собой работу, произведенную системой в результате цикла (см. рис.). Коэффициент полезного действия (КПД) цикла равен отношению произведенной работы к затраченному теплу:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — тепло, поглощенное системой; Q_2 — выделенное тепло; A — произведенная работа, равная $Q_1 - Q_2$ (согласно первому закону *термодинамики*).

Цикл Карно — обратимый круговой процесс, в котором совершается превращение теплоты в работу. Как видно на рисунке, он состоит из двух изотерм и двух адиабат. На первом этапе (1—2) цилиндр тепловой машины соединяют с нагревателем: газ в цилиндре получает

Как происходит в тепловой машине превращение тепла в полезную работу? Ответ на этот вопрос дал французский инженер Сади Карно. Он показал, что превращение тепла в работу может совершаться лишь в процессе передачи тепла от более нагретого тела к менее нагретому. Он же рассмотрел замкнутый (циклический) процесс, при котором тепловая машина может иметь наибольший коэффициент полезного действия. Этот циклический процесс называют циклом Карно.

тепло и, расширяясь при постоянной температуре T_1, совершает работу. На втором этапе (2—3) система адиабатически изолирована (не получает и не отдает тепла), газ продолжает расширяться. При таком адиабатическом расширении работа совершается за счет внутренней энергии системы, и температура падает до T_2. Начинается третий этап (3—4) — изотермическое сжатие: цилиндр соединяют с холодильником, которому газ отдает некоторое количество тепла и сжимается при постоянной температуре T_2. Наконец, на четвертом этапе газ адиабатически сжимается, температура растет до T_1, и система возвращается в исходное состояние.

Коэффициент полезного действия цикла Карно $\eta = 1 - T_2/T_1$ и не зависит от природы рабочего вещества в цилиндре. Не существует другого цикла при тех же температурах T_1 и T_2, который имел бы больший КПД.

Цикл Карно сыграл важную роль в развитии термодинамики (на его основе, в частности, сформулирован второй закон *термодинамики*) и теплотехники и до сих пор используется при анализе работы тепловых машин.

КВАЗИЧАСТИЦЫ

Понятие квазичастицы было введено советским ученым Л. Д. Ландау в 1940 г. Оно играет большую роль в современной физике. Квазичастицами называют элементарные возбуждения квантовых систем (см. *Квантовая механика*).

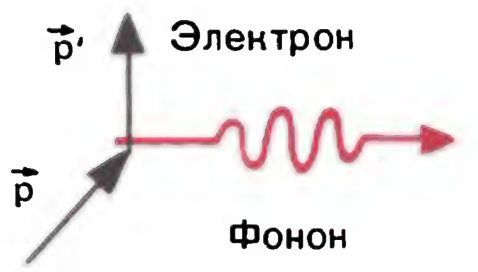
Из школьного курса физики известно, что энергия *электрона* в *атоме* не может быть любой и принимает только определенные дискретные значения. Когда электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, он поглощает (или испускает) квант излучения.

Теперь представим себе: два атома сблизились так, что образовалась новая квантовая система — *молекула*. Электроны в молекуле уже являются «собственностью» обоих атомов, и у молекулы появляются свои уровни энергии. Возбуждение молекулы, переходы с уровня на уровень теперь затрагивают «орбиты» обоих электронов.

В *твердом теле* имеется огромное количество взаимодействующих атомов, но и у этой квантовой системы энергия принимает дискретные значения.

Переходы между состояниями с разными энергиями, вообще говоря, влияют на движение всех электронов. Возбуждение одного из уровней квантовой системы не остается локализованным в данном месте, а передается соседним электронам системы в виде некоторой волны возбуждения, у которой есть определенная частота ω и длина волны λ. В квантовой механике этой волне соответствует некоторый квант, получивший название квазичастицы, с энергией $\hbar\omega$ и импульсом $2\pi\hbar = \hbar/\lambda$ (его называют квазиимпульсом). Можно сказать и несколько по-другому: переход квантовой системы в каждое следующее возбужденное состояние рассматривается как рождение новой квазичастицы. Энергия квазичастицы равна разности энергий уровней системы.

Взаимодействие электрона с кристаллической решеткой.



Квазичастицы рождаются не только при возбуждении электронной системы. Возникновение волн колебаний атомов в кристаллической решетке также удобно описывать на языке квазичастиц (см. *Фонон*). Ими пользуются и при описании магнитных свойств вещества (магноны), плазмы (плазмоны) и т. д.

С помощью квазичастиц можно описывать различные взаимодействия в твердых телах. Например, взаимодействие с внешним излучением сводится к столкновению квантов этого излучения с соответствующими квазичастицами твердого тела. Такие процессы изображают с помощью специальных диаграмм (см. рис.), и в квантовой теории их легко рассчитать, используя законы сохранения энергии и импульса.

Концепция квазичастиц работает эффективно при *низких температурах*, когда возбуждение системы слабое. В таком случае квазичастиц мало, и они образуют подобие идеального газа (взаимодействуют между собой только при столкновениях). Идеальный газ — это простейшая многочастичная система, и ее свойства легко исследовать.

Квазичастицы не следует путать с обычными частицами, из которых состоит квантовая система. Каждая квазичастица описывает коллективное возбуждение всей системы, обычно состоящей из гигантского количества частиц.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

В 1900 г. М. Планк обнаружил, что имеется единственная возможность объяснить распределение по частотам излучения из отверстия в ящике с нагретыми стенками (см. *Физические парадоксы*): частицы, излучающие волны частоты ω, могут изменять свою энергию только скачкообразно, порциями $\hbar\omega$. Коэффици-

ент $\hbar$ называют постоянной Планка.

Основываясь на этом, Планк получил свою знаменитую формулу, с огромной точностью описавшую экспериментальное распределение интенсивности излучения для всех частот и при всех температурах стенок. Классическая физика не знала такой скачкообразности — скачки энергии так малы из-за малости $\hbar$, что изменения кажутся непрерывными.

В 1905 г. скачкообразность подтвердилась работой А. Эйнштейна по теории *фотоэффекта*. Фотоэффект можно объяснить, только предположив, что свет — это набор частиц — *фотонов*, которые, взаимодействуя с *электроном*, выбрасывают его из *атома*. Представление о свете как о классической *электромагнитной волне* не могло объяснить концентрации энергии на одном электроне, необходимой для его вырывания. Эйнштейн показал, что фотон с энергией ε имеет импульс $p = \varepsilon/c = \hbar\omega/c = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$. Энергия волны заданной частоты может изменяться только скачкообразно, порциями $\hbar\omega$, подобно энергии излучателей в рассуждении Планка. Скачкообразность распространилась и на электромагнитные волны.

В некотором смысле точка зрения Эйнштейна означала возврат к ньютоновской теории корпускул (см. *Оптика, Фотон*). Опять возник вопрос, на который не смог ответить И. Ньютон: как объединить волновую природу света, доказанную опытами по *интерференции* и *дифракции*, с корпускулярной, необходимой для объяснения *фотоэффекта*?

В 1913 г. Н. Бор распространил на атом идею о дискретности возможных значений энергий излучателей: допустимы не все орбиты,

МАКС КАРЛ ЭРНСТ ЛЮДВИГ ПЛАНК (1858 — 1947)

Когда Планк учился в Мюнхенском университете, один из его учителей советовал ему не связывать свои научные интересы с физикой. По словам профессора, стройное здание этой науки уже построено, осталось завершить лишь некоторые детали. Такое мнение о будущем физики к концу XIX в. имело немало ученых.

Молодой Макс Планк не послушался своего университетского наставника и стал одним из основателей новой физики. В 1900 г. Планк положил начало квантовой теории. На заседании Берлинского физического общества 14 декабря он высказал парадоксальную идею, которая противоречила представлениям классической физики: энергия может излучаться и поглощаться лишь отдельными, малыми и неделимыми порциями, или квантами. Полагая, что энергия кванта пропорциональна частоте колебания, Планк дал вывод закона распределения энергии абсолютно черного тела. Постоянная Планка h оказалась новой мировой константой.

«...Закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от других предложений. Более того, он убедительно показал, что кроме атомистической структуры материи существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной, введенной Планком. Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX в. ...»— так спустя десятилетия охарактеризует квантовую теорию Планка Альберт Эйнштейн, который одним из первых применил ее на практике (объяснение *фотоэффекта*). В 1918 г. Планку была присуждена Нобелевская премия.

Планк был одним из первых, кто принял и всецело поддержал *теорию относительности* Эйнштейна (кстати, он и предложил сам термин «теория относительности»), а также развивал ее в своих работах.

Важные исследования провел Планк в области *термодинамики*.

На протяжении всей жизни он не раз пересматривал свое первоначальное понимание квантовой теории и всегда с интересом и вниманием относился к достижениям других ученых. Планк высоко оценил квантовую теорию атома Н. Бора и появление *квантовой механики*.

Много внимания он уделял философским вопросам физики, часто выступая с публичными лекциями и докладами. Лучшие из них составили книгу «Пути познания в физике», которая вышла в свет в 1933 г. «Задачей физики является изучение реального внешнего мира»,— считал Планк и пытался объяснить этот мир с материалистических позиций.

Один из крупнейших представителей *атомной физики*, Планк имел огромный авторитет в научном мире. Он был избран почетным членом многих академий, университетов и научных обществ разных стран, в том числе в 1926 г.— Академии наук СССР.

а лишь некоторые. Бор установил правила для нахождения этих допустимых орбит. С классической точки зрения электрон, вращающийся вокруг ядра, должен излучать *электромагнитные волны*. Он движется с ускорением, а по законам классической *электродинамики* не излучает только заряд, движущийся по прямой с постоянной скоростью. Почему же электрон не падает на ядро, излучая свет?

Согласно правилам Бора, электрон может излучать свет только при переходе с одной орбиты на другую порциями с частотой ω, равной $\omega = (E_n - E_m)/\hbar$, где E_n и E_m — значения энергии электрона на n-той и m-той орбитах. На орбите с наименьшей возможной энергией электрон живет неограниченно долго — ему некуда переходить. Так была объяснена стабильность атомов.

Теория Бора описывала все главнейшие свойства атомов, но смысл правил квантования оставался загадочным. Бор назвал их постулатами — недоказанными предположениями. Их смысл стал ясен только после создания квантовой механики.

Правила квантования Бора — одно из удивительных явлений в истории науки. Только гениальным озарением можно объяснить появление этой теории до того, как выяснились волновые свойства частиц. Эйнштейн сказал по этому поводу: «Это высшая музыкальность в области теоретической мысли».

В 1924 г. французский ученый Л. де Бройль предположил, что поведение частиц, например электронов, должно описываться волновым процессом с длиной волны λ, связанной с количеством движения p так же, как связа-

ЭРВИН ШРЁДИНГЕР (1887 — 1961)

Этот австрийский ученый, один из создателей *квантовой механики,* в 1926 г. ввел дифференциальное уравнение, носящее его имя. Уравнение Шрёдингера стало той основой, на которой покоится весь математический аппарат квантовой механики. Ученый опирался на идею Л. де Бройля о том, что *электрон* обладает как корпускулярными, так и волновыми свойствами. Он рассматривал электрон в ипостаси пространственной стоячей волны, распределенной вокруг ядра, и ввел знаменитую «пси-функцию» (Ψ-функцию): она описывала амплитуду колебаний волны. Форма колебаний зависела от квантовых чисел электрона — главного (n), орбитального (l) и магнитного (m), они получались как численные решения уравнения Шрёдингера. Но точное его решение было возможно только для атома водорода (см. *Квантовая механика*). Это уравнение играет в описании атомных процессов такую же фундаментальную роль, как и законы Ньютона в классической *механике*. Образно говоря, Шрёдингер перевел ее представления на язык квантовой теории.

В 1933 г. он был удостоен Нобелевской премии (совместно с английским физиком П. Дираком): «За открытие новых форм атомной теории»,— под этим подразумевалось создание волновой механики. Э. Шрёдингер доказал также, что она эквивалентна так называемой матричной квантовой механике, разработанной в 1925 г. В. Гейзенбергом. Ныне названия «квантовая» и «волновая» рассматриваются как синонимы. Но сам Шрёдингер до конца жизни оставался во власти противоречия: он не воспринимал квантовую механику как завершенную теорию. Ученый пытался истолковать атомные процессы лишь в волновом аспекте, оставляя в стороне корпускулярный.

Шрёдингер жил в Австрии только в молодости и в последние четыре года жизни. Основная часть его творческой деятельности протекала в Германии, Швейцарии (свое уравнение он ввел, будучи профессором Цюрихского университета), Англии и Ирландии. Он разрабатывал некоторые проблемы общей *теории относительности*; как и многие его современники-физики, пытался найти пути к разработке единой теории поля; опубликовал несколько исследований по *термодинамике* и *электродинамике*. Шрёдингер написал полную интересных и глубоких мыслей книгу «Что такое жизнь? С точки зрения физика», в которой, в частности, затронул некоторые вопросы генетики, впоследствии оказавшиеся в центре внимания исследователей.

Э. Шрёдингер был почетным членом многих академий и научных обществ разных стран мира, в том числе Академии наук СССР (1934).

на длина волны *фотонов* с их импульсом: $\lambda = 2\pi\hbar/p$. Уже через три года это предсказание подтвердилось опытом: американские физики К. Дэвиссон и Л. Джермер открыли дифракцию электронов на кристаллах — электрон, действительно, ведет себя как волна. По расположению дифракционных пятен после прохождения кристалла можно было найти длину волны, связанной с электроном данной энергии. Она совпала с предсказанием де Бройля.

Следующее важное событие произошло в 1926 г. Э. Шрёдингер обобщил догадку де Бройля на случай, когда электрон движется не в свободном пространстве, а во внешнем поле, например в кулоновском поле ядра. Он получил уравнение для функции, описывающей волновые свойства частиц. В свободном пространстве решение этого уравнения переходит в функцию, описывающую волновой процесс с длиной волны де Бройля. Во внешнем поле длина волны изменяется от точки к точке. Стационарное состояние электрона в атоме водорода на языке уравнения Шрёдингера означает, что получилась стоячая волна. Для этого в области движения электрона должно уложиться целое число волн де Бройля. В этом и состоит смысл правил квантования Бора. Стоячие волны могут образоваться только при дискретных значениях энергии электрона, когда укладываются 1, 2 и т. д. волн.

Вот простой пример того, как получаются дискретные уровни энергии. Предположим, что частица движется в одном направлении внутри интервала длины l, или, иными словами, внутри потенциальной ямы длины l с бесконечными стенками. Волновая функция на краях ямы должна обращаться в нуль. Стационарное состояние получается из условия, что на длине l должно уложиться целое число полуволн $2l/\lambda = n$. Теперь используем формулу, связывающую длину волны де Бройля с импульсом частицы: $p = 2\pi\hbar/\lambda = \pi\hbar n/l$. Найдем энергию $E = p^2/2m$. Нетрудно получить такую формулу: $E = \pi^2\hbar^2n^2/2ml^2$. Аналогично можно найти и уровни энергии в более сложных случаях.

Вот как выглядит уравнение Шрёдингера для одномерного движения в потенциале $V(x)$:

$$\frac{d^2\psi}{d^2x^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0$$

Первое слагаемое — вторая производная Ψ по x. Если первая производная характеризует скорость изменения Ψ с x, то вторая производная дает скорость изменения этой скорости.

Решения этого уравнения для $V = 0$ очень легко найти. Их два: $\Psi_1 = a_1 \sin kx$ и $\Psi_2 = a_2 \cos kx$. Они и описывают волны де Бройля: $k = 2\pi/\lambda = p/\hbar = \sqrt{2mE}/\hbar$.

Для частицы, колеблющейся около положения равновесия, когда возвращающая сила пропорциональна величине отклонения x, потенциал $V(x)$ имеет вид: $V(x) = \gamma x^2/2$. Точное решение уравнения Шрёдингера для подобного потенциала непростая задача; приведем только результат. Возможные значения энергии такого осциллятора $E_n = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega$. В наинизшем состоянии ($n = 0$), в отличие от классического осциллятора, ни кинетическая, ни потенциальная энергии не равны нулю. Сумма их равняется $\hbar\omega/2$. Частица колеблется около положения равновесия, так что среднее значение кинетической энергии равняется среднему значению потенциальной и равняется $\hbar\omega/4$.

Опыты по дифракции электронов тоже описываются уравнением Шрёдингера, если предположить, что интенсивность пучка электронов после рассеяния пропорциональна квадрату модуля волновой функции. Там, где волны, рассеянные атомами кристаллической решетки, складываются, получается максимальная интенсивность электронного пучка.

При уменьшении интенсивности пучка обнаруживается, что дифракционная картина не изменяется, даже если пролетает, скажем, один электрон в минуту. Значит, уже одному электрону нужно приписать вероятность попасть в то или иное место фотопластинки, стоящей за кристаллом.

В 1926 г. немецкий физик М. Борн предположил, что вероятность найти электрон в том или ином месте равняется квадрату модуля волновой функции. Что же помогло прийти к такому заключению?

Вспомним, что теория волновых явлений света — интерференции и дифракции — была разработана задолго до уравнения Максвелла, т. е. до понимания электромагнитной природы света. Предполагалось только, что источник света испускает волны неизвестной природы, а интенсивность света пропорциональна квадрату той величины, которая колеблется. В современном представлении колеблются во времени и пространстве электрические и магнитные поля, и интенсивность света пропорциональна их квадрату. Но почти все волновые проявления объясняются независимо от природы света.

Было естественно и для волн, связанных с частицами, считать, что есть некий волновой процесс, а интенсивность — в нашем случае вероятность — пропорциональна квадрату модуля волновой функции.

Сначала предполагали, что волновым свойствам частицы соответствует некое реальное физическое поле, подобное электромагнитному полю в световой волне. Но тогда уже один электрон давал бы в одном акте всю дифракционную картину, а он чернит только одно зерно фотопластинки. И это не единственный довод против такого взгляда на природу волнового процесса.

Итак, волновая функция частицы не есть какое-либо физическое поле; она описывает потенциальные возможности исхода того или иного последующего наблюдения.

Истинный смысл волновой функции выяснился после того, как В. Гейзенберг получил *соотношение неопределенностей* (1927), и особенно в многолетних спорах Н. Бора с А. Эйнштейном.

Квантовая механика не дает однозначного ответа на некоторые вопросы, а лишь вероятность того или иного результата. Главное открытие квантовой механики — вероятностный характер предсказаний — следствие того, что мы пользуемся классическими понятиями, не имеющими точно определенного смысла (см. *Соотношение неопределенностей*).

Дальнейшее развитие квантовая механика получила в работах английского физика П. Дирака, обобщившего уравнение Шрёдингера на случай частиц со *спином* 1/2, движущихся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Основное следствие уравнения Дирака состоит в том, что наряду с частицами должны существовать античастицы (например, наряду с *электроном* — позитрон), отличающиеся от частиц только знаком заряда.

В 1930 г. Э. Ферми применил квантовую механику к электромагнитному полю. Волна с волновым вектором k представляет собой осциллятор, в котором колеблются электрическое и магнитное поля. Энергия магнитного поля играет роль потенциальной энергии осциллятора, а энергия электрического поля — роль кинетической. Но применение квантовой механики к осциллятору приводит к тому, что энергия осциллятора может изменяться порциями величины $\hbar\omega$ и, кроме того, в состоянии с наинизшей энергией кинетическая и потенциальная энергии не равны нулю. В *вакууме*, где нет ни одной частицы, ни одного кванта, электрическое и магнитное поля для каждого волнового вектора колеблются около нулевого значения. В пустоте существуют нулевые колебания электромагнитного поля. Если для какого-нибудь волнового вектора энергия переходит из самого нижнего значения в первое возбужденное, говорят, что в пространстве появился один квант с волновым вектором k, энергией $\varepsilon = \hbar kc$, импульсом $p = \hbar k$. Это и есть *фотон*, предсказанный Эйнштейном в 1905 г.

Согласно уравнению Шрёдингера, атом должен был бы неограниченно долго находиться в любом возбужденном состоянии. Именно нулевые колебания заставляют электрон переходить на более низкую орбиту с испусканием кванта света — фотона.

Применение квантовой механики к другим полям, например к описывающим электроны и позитроны, приводит к аналогичному результату — в вакууме существуют нулевые колебания электрон-позитронного поля, непрерывно рождаются и исчезают всевозможные частицы. Такие временно образующиеся частицы называют виртуальными (см. *Вакуум физический*).

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Так называют теорию взаимодействия *электронов*, позитронов и *фотонов*. Квантовая электродинамика была создана усилиями целого ряда физиков-теоретиков — В. Гейзенберга, В. Паули, П. Дирака, Р. Фейнмана и других. В основе ее, как и любой иной квантовой теории поля, лежит представление о заполняющем пространство поле, в котором возможны элементарные возбуждения — кванты (см. *Поля и частицы*).

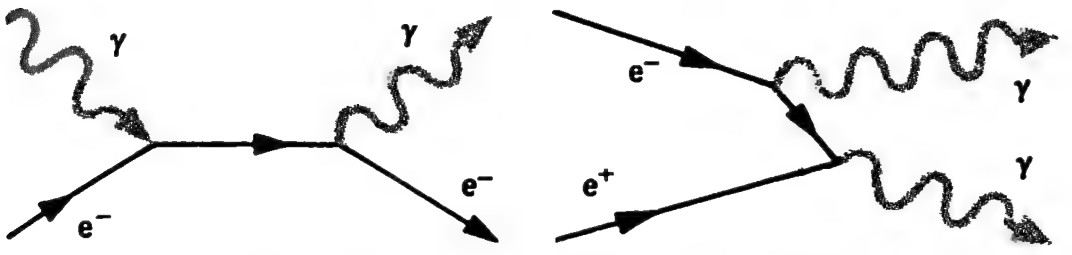
Фотон — это квант электромагнитного поля, а электроны и позитроны — кванты электрон-позитронного поля (обычно термин «квант» применяют только к фотонам).

Квантовая электродинамика — релятивистская теория, т. е. ее уравнения подчиняются принципам *теории относительности*: они одинаково выглядят и в покоящейся, и в равномерно движущейся системах координат. Другое важное свойство квантовой электродинамики — локальность. Оно состоит в том, что элементарное взаимодействие — испускание или поглощение фотона электроном или позитроном — происходит мгновенно и в бесконечно малой области пространства. Причем локальное взаимодействие происходит не в пустоте, а в *физическом вакууме*. Присутствующие в физическом вакууме виртуальные частицы (фотоны и электрон-позитронные пары) перераспределяются при внесении реальной частицы и в процессе локального взаимодействия.

Этот эффект — поляризация вакуума — весьма мал, но он имеет принципиальное значение, поскольку вносит вклад во все процессы взаимодействия и должен учитываться квантовой теорией поля. Долгое время не уда-

Элементарные процессы квантовой электродинамики: а) испускание фотона, электрона или позитрона; б) поглощение фотона электроном или позитроном; в) аннигиляция; г) рождение пары частиц. Линии изображают траектории частиц, а точка в вершине — процесс локального взаимодействия.

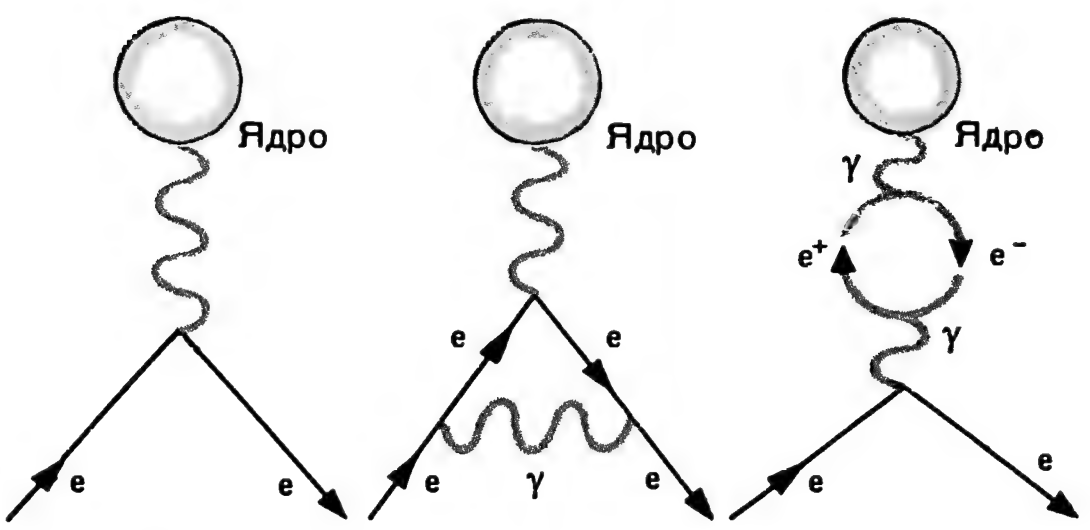
Комптона эффект (*слева*) и аннигиляция в 2 фотона.



валось вычислить поляризацию вакуума из-за так называемых ультрафиолетовых расходимостей. Дело в том, что число виртуальных частиц в вакууме не ограничено. Не ограничен и вклад в поляризацию вакуума виртуальных частиц с большими импульсами, т. е. с малыми (ультрафиолетовыми) длинами волн де Бройля. Все это приводило при расчете ряда физических величин, таких, как масса частицы, ее заряд и т. д., к бессмысленным результатам — бесконечностям.

Успех в преодолении этой трудности в квантовой электродинамике был достигнут физиком-теоретиком Х. Бёте, заметившим, что соотношения между непосредственно наблюдаемыми величинами, например, сдвигом уровней атома от поляризации вакуума и наблюдаемыми массой и зарядом электрона, не содержат бесконечных величин. Вклады ультрафиолетовых виртуальных частиц при этом взаимно компенсируются. Была разработана специальная математическая техника, позволившая устранить из теории квантовой электродинамики бесконечные величины. Эта техника получила название м е т о д а п е р е н о р м и р о в о к. При разработке более общей теории необходимо было бы учитывать, что кроме электронов и фотонов есть и другие частицы, виртуально возникающие в физическом вакууме, и другие силы, кроме электромагнитных. И следовало бы найти настоящую, физическую причину для ограничения импульсов виртуальных частиц, а не вводить это ограничение как математический прием.

Рождение виртуальных частиц при взаимодействии электрона с кулоновским полем атомного ядра.



Теоретики предполагают, что физические причины ограничения импульсов виртуальных частиц связаны с ростом их гравитационного поля и возникают при импульсах порядка 10^{19} ГэВ/ с. Но для исследования явлений на наблюдаемых масштабах энергий можно не вникать в детали этих сложных и неизученных

ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ ФОК (1898 — 1974)

В 1931 г. в Ленинграде вышла в свет книга под названием «Начала квантовой механики». Ее автором был 33-летний научный сотрудник Государственного оптического института Владимир Александрович Фок, впоследствии профессор Ленинградского университета (с 1932 г.), академик (с 1939 г.). Эта книга явилась первым в СССР систематизированным учебником по квантовой механике; по нему училось не одно поколение физиков.

Выдающийся советский ученый, Герой Социалистического Труда В. А. Фок внес большой вклад в развитие *теоретической физики*. Его работы были посвящены теории тяготения, теории упругости, оптике, квантовой механике, квантовой теории поля. Фок использовал в квантовой теории поля методы *квантовой механики*. Взаимные превращения частиц, порождение одних и уничтожение других можно количественно описывать при помощи так называемого метода вторичного квантования, предложенного в 1927 г. английским ученым П. Дираком и получившего дальнейшее развитие в работах В. А. Фока (1932).

Всех, кому довелось работать вместе с В. А. Фоком, всегда поражала удивительная математическая мощь его мышления, умение найти решение сложнейших задач на основе простых и неожиданных методов. Именем В. А. Фока названы отдельные уравнения и методы. Физики-теоретики хорошо знакомы с уравнением Клейна — Гордона — Фока, выведенного на основе обобщения волнового уравнения квантовой механики, с методом Хартри — Фока в квантовой теории многоэлектронных систем.

За фундаментальные исследования по теории распространения радиоволн В. А. Фок был в 1946 г. удостоен Государственной премии СССР. Его исследования по *квантовой механике* и *теории относительности* были отмечены в 1960 г. присуждением Ленинской премии.

процессов, подобно тому как в небесной механике можно не вникать в детали строения вещества. Оказалось, что наблюдаемые величины в квантовой электродинамике не зависят от распределения по импульсам ультрафиолетовых виртуальных частиц.

Предсказания квантовой электродинамики согласуются с опытом с огромной точностью (так, например, определены 11 десятичных знаков для *магнитного момента* электрона). Область ее применения весьма широка — это и *атомная физика*, и *астрофизика*, и теория *плазмы*, и теория *лазера*.

В современной физике *элементарных частиц* квантовая электродинамика объединяется с теорией *слабых взаимодействий* в единую теорию электрослабых сил (см. *Единство сил природы*). Кроме фотонов, электронов и позитронов эта теория рассматривает другие *лептоны, кварки* и так называемые $W^{\pm}$-, Z- и H-б о з о н ы. Последние два типа частиц пока не обнаружены на опыте.

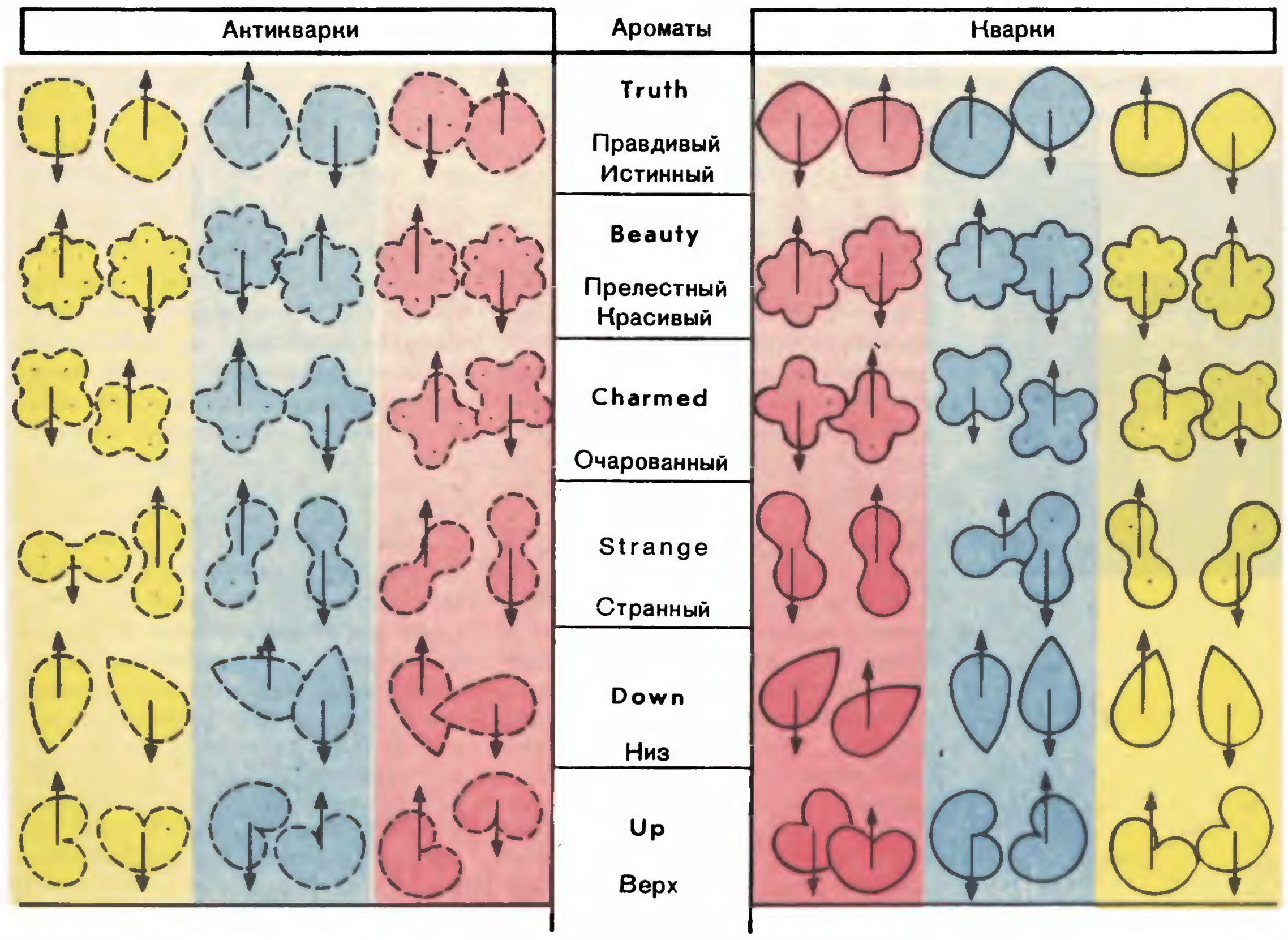
КВАРКИ

Кварк — частица со *спином* 1/2 и дробным электрическим зарядом, являющаяся составным элементом *адронов*. Это название было заимствовано М. Гелл-Маном в одном из романов Дж. Джойса. По-немецки «кварк» — «творог», но в романе это слово означает нечто двусмысленное и таинственное; герою снится сон, где чайки кричат: «Три кварка для мастера Марка». Термин вошел в научный обиход, возможно, потому, что соответствовал двусмысленной и таинственной роли кварков в физике.

Все известные *адроны* состоят либо из пары кварк — антикварк (м е з о н ы), либо из трех кварков (б а р и о н ы). Кварки (и антикварки) удерживаются внутри адронов глюонным полем. Помимо спина кварки имеют еще две внутренние с т е п е н и с в о б о д ы — «аромат» и «цвет».

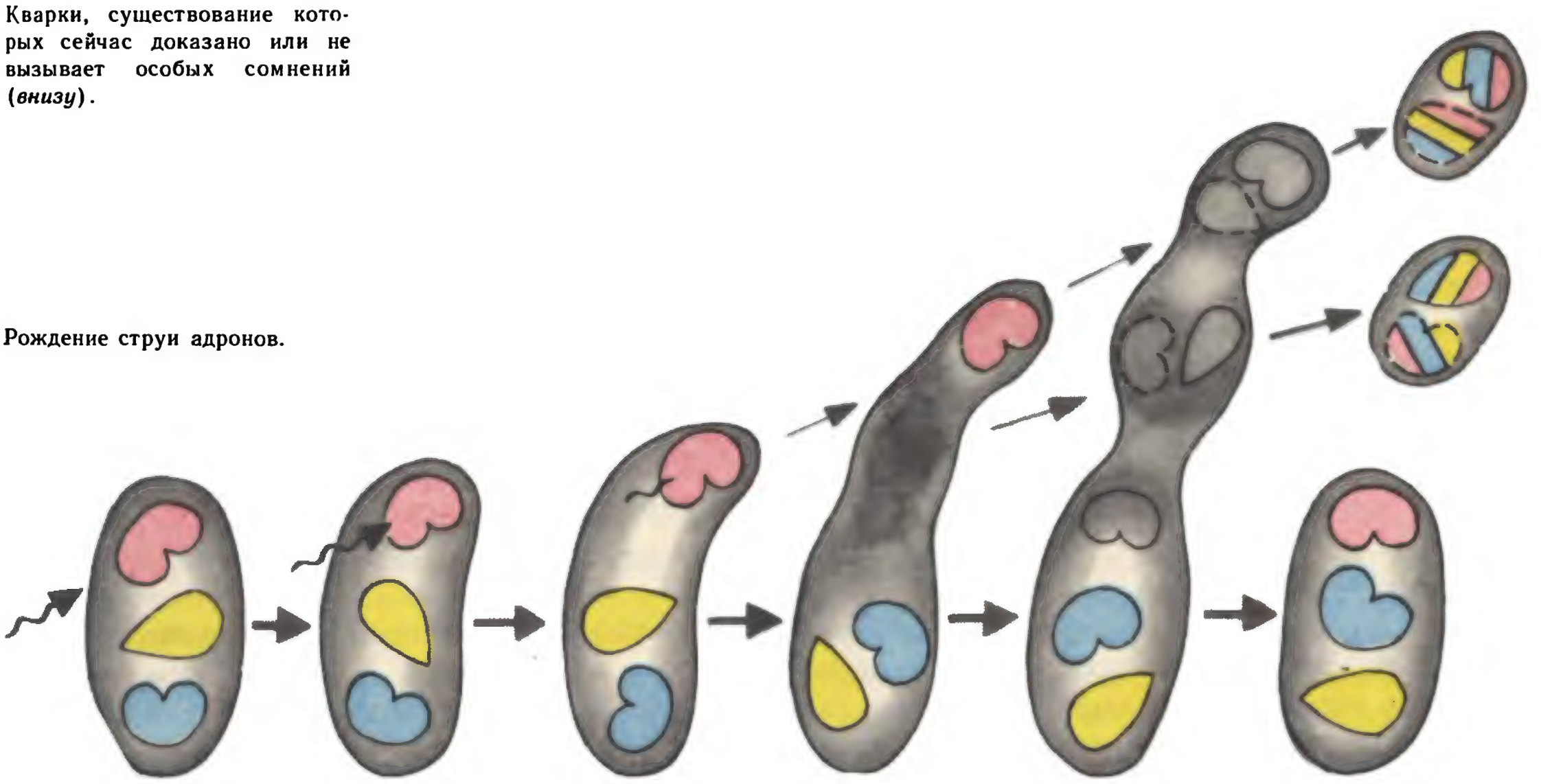
Каждый кварк может находиться в одном из трех «цветовых» состояний, которое условно называют «красным», «синим» и «желтым». Эта терминология введена для удобства и не имеет отношения к оптическим свойствам — все три «цветовых» состояния одинаково поглощают и испускают кванты света. Массы всех цветовых состояний также строго одинаковы.

Что касается «ароматов», то их известно пять и предполагается наличие шестого. Свойства кварков с различными «ароматами» различны, и поэтому их обозначают различными буквами, в порядке возрастания массы: u, d, s, c, b, t. Последний t-кварк настолько тяжел, что его пока не удалось наблюдать. Заряды d-, s-, b-кварков равны $-1/3$, а заряды



Кварки, существование которых сейчас доказано или не вызывает особых сомнений (*внизу*).

Рождение струи адронов.



остальных кварков равны 2/ 3 в единицах заряда *протона.*

Подсчитаем полное число внутренних степеней свободы. Каждый кварк u, d, s, c, b, t может быть окрашен в любой из трех цветов, иметь по два спиновых состояния $\pm$ 1/ 2 и по два зарядовых состояния (частица и античастица). Это дает $6 \times 3 \times 2 \times 2$, т. е. 72 варианта.

Обычное вещество состоит из легчайших u- и d-кварков, входящих в состав нуклонов ядер (см. *Ядро атомное*). Более тяжелые кварки создаются искусственно в экспериментах на *ускорителях заряженных частиц* или наблюдаются в *космических лучах.*

Слова «создаются» и «наблюдаются» нуждаются в оговорке. Ни один кварк — ни легкий, ни тяжелый — ни разу не был зарегистрирован в свободном виде, несмотря на многолетние поиски. Кварки можно наблюдать только внутри адронов.

При попытке выбить кварк из адрона происходит следующее. Вылетающий кварк рождает на своем пути из вакуума пары кварк — антикварк, расположенные в порядке убывания скоростей. Один из медленных кварков занимает место исходного, а тот образует вместе с остальными рожденными кварками и антикварками струю адронов (см. рис.).

При этом либо тройки кварков соединяются в барионы, либо пары кварк — антикварк — в мезоны. Почему же невозможны другие комбинации, и в частности одиночный кварк? Эта загадка пока еще не разгадана наукой (см. *Адроны, Сильные взаимодействия*).

Кварки участвуют во всех известных *взаимодействиях* — гравитационных, *слабых,* электромагнитных и *сильных.* Неизвестно, из чего состоят сами кварки; возможно, они элементарны. Их собственный размер, во всяком случае, меньше 10^{-16} см.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Кинетическая теория исследует процессы, происходящие в веществе, исходя из тех молекулярных движений, которые совершают частицы вещества. Основная ее идея заключается в том, что материальные тела состоят из мельчайших частиц (*атомов, молекул*), находящихся в непрерывном движении. Эта идея была известна еще древнегреческим философам. Согласно Демокриту (ок. 460—370 до н. э.), атомы, соединяясь и разъединяясь, образуют все безграничное разнообразие вещей в природе. Быстрое развитие кинетической теории началось лишь в середине XIX в. в связи с развитием теории *газов*, тепловых машин и *термодинамики.*

Кинетическая теория описывает как течение процессов (скорость, изменение свойств вещества во времени) — то, чего термодинамика не делает, — так и состояние *теплового равновесия.* С точки зрения этой теории равновесие — это такая ситуация, когда различные молекулярные процессы уравновешивают друг друга. Скажем, при равновесии между жидкостью и ее насыщенным паром (см. *Испарение*) число испаряющихся в единицу времени частиц жидкости должно быть равно числу конденсирующихся частиц пара.

Наиболее ранней и наиболее развитой является кинетическая теория газов. Основной вклад в нее внесли Р. Клаузиус (1822—1888), Дж. Максвелл (1831—1879) и Л. Больцман (1844—1906). В развитии кинетической теории газов большую роль сыграло представление молекул в виде абсолютно твердых, упругих шариков.

Согласно кинетической теории, частицы (атомы, молекулы) в газе находятся на расстo-

Удары молекул о стенки создают давление газа.

яниях друг от друга, больших по сравнению с их размерами, движутся прямолинейно и равномерно, изредка сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. Удары молекул о стенки сосуда создают *давление* газа. Представление о длине свободного пробега молекул газа (между последовательными столкновениями) ввел немецкий физик Р. Клаузиус, он же первый вычислил давление газа. Оно пропорционально числу молекул в единице объема и среднему значению их кинетической энергии. Каково бы ни было начальное распределение молекул газа по скоростям, в результате столкновений скорости одних частиц возрастают, других — уменьшаются, и в конечном счете устанавливается максвелловское распределение. Известно, что при этом молекулы газа обладают всеми возможными скоростями — от очень маленькой до очень большой, но средний квадрат скорости (т. е. сумма квадратов скоростей всех молекул, деленная на число молекул) зависит только от абсолютной *температуры газа* T и *массы* m молекул: $<v^2> = 3kT/m$, где k — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Скобками $< >$ обозначено среднее значение. Скажем, для кислорода при 300К $<v^2> = 2{,}42 \cdot 10^5$ м^2/с^2, а корень квадратный из этого числа, так называемая среднеквадратичная скорость молекулы кислорода, составляет 492 м/с. Средняя кинетическая энергия молекулы $\frac{m}{2}<v^2>$ и, следовательно, равна $\frac{3}{2}kT$, т. е. пропорциональна абсолютной температуре.

Молекула водорода при той же температуре имеет среднеквадратичную скорость около 2000 м/с. Таким образом, скорости молекул газа велики, больше, чем, например, скорости артиллерийских снарядов, а перемещаются молекулы довольно медленно. Мы знаем по опыту, что требуется несколько десятков секунд, чтобы запах духов дошел из одного угла комнаты в другой. Такое замедление связано с тем, что молекулы газа движутся не по прямой, а по сложной траектории, все время меняя направление своего движения (см. *Броуновское движение, Диффузия*) вследствие столкновений с другими молекулами.

ЛЮДВИГ БОЛЬЦМАН (1844 — 1906)

Австрийский физик, один из основоположников классической *статистической физики* и физической кинетики. Член Венской академии наук и многих академий мира.

Родился в Вене. В 1866 г. окончил Венский университет. Был профессором Венского, Лейпцигского, Мюнхенского университетов и университета в Граце.

Научные интересы Больцмана охватывали почти все области физики. Он автор работ по *механике*, гидродинамике, теории упругости, теории электромагнитного поля, *оптике*, *термодинамике*. Но наибольшее значение имеют исследования по *кинетической теории газов*. Применив статистические методы, Больцман установил закон распределения скоростей молекул газа под влиянием внешних сил, например силы тяжести. Вывел основное кинетическое уравнение для газов, заложив основы физической кинетики. Больцман дал статистическую трактовку второго закона термодинамики. Одна из основных физических постоянных, равная отношению универсальной газовой постоянной R к числу Авогадро (см. *Авогадро закон и число*): $k = R/N_A$, называется постоянной Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Л. Больцману принадлежат первые экспериментальные работы по проверке выводов теории электромагнитного поля Дж. Максвелла. Важное значение имело также теоретическое обоснование закона излучения нагретых тел, полученного в экспериментах профессора Венского университета Й. Стефана (закон Стефана — Больцмана). Идеи, положенные в основу этого закона, были позднее использованы М. Планком при создании квантовой теории поля.

Л. Больцман был убежденным сторонником молекулярной теории и отстаивал ее в борьбе против идеалистических течений в науке.

Столкновения между частицами газа очень важны для релаксационных процессов. Так называются процессы, приближающие газ к *тепловому равновесию* в условиях однородного давления. Сюда относятся процессы диффузии (перемешивания разных газов), *теплопроводности* (выравнивания температуры) и *вязкости* (или внутреннего трения), проявляющейся в прекращении движения газа как целого в неподвижном сосуде. Кинетическая теория позволяет рассчитать скорости этих процессов.

Вслед за кинетической теорией *газов* в начале XX в. развивается кинетическая теория *твердых тел*. В твердых телах *атомы* (или ионы) расположены очень близко друг к другу и всюду одинаково, образуя правильную кристаллическую решетку. Обычно межатомное расстояние составляет несколько десятых долей нанометра. Тепловое движение сводится при этом к малым колебаниям каждого атома около положения равновесия в узле кристаллической решетки. Амплитуда колебания обычно составляет несколько процентов от межатомного расстояния. Различные упрощения этой картины позволили А. Эйнштейну и П. Дебаю рассчитать *теплоемкость* твердых тел. В частности, Эйнштейн предположил, что при высоких температурах все атомы колеблются с одинаковой частотой и колебания всех атомов независимы.

Учет неодинаковости колебаний атомов приводит к тому, что при низких температурах теплоемкость твердых тел пропорциональна кубу абсолютной температуры (теория Дебая) и стремится к нулю при стремлении температуры к абсолютному нулю (теорема Нернста, третий закон термодинамики). А учет отступлений свойств реальных твердых тел от свойств идеальных упругих тел, подчиняющихся закону Гука (см. с. 173), позволил построить теорию релаксационных процессов в твердых телах, связанных с перераспределением энергии между разными видами колебаний, объяснить тепловое расширение твердых тел.

Большую роль для правильного описания *диффузии* в *твердых телах* сыграли представления, выдвинутые советским ученым Я. И. Френкелем, о наличии в кристаллической решетке пустых узлов — вакансий, число которых сильно растет с увеличением температуры.

Начало разработке кинетической теории *жидкостей* тоже положил Я. И. Френкель в 1924 г. Он исходил из сходства между жидким состоянием и твердым. Тепловое движение молекул в жидкости, по Френкелю, представляет собой, как и в твердом теле, малые колебания около положечия равновесия, но само положение равновесия, в отличие от кристалла, время от времени скачкообразно смещается на расстояние порядка межатомного. Отсюда оказалось возможным исследовать основное свойство жидкостей — их текучесть или *вязкость* и объяснить уменьшение последней с ростом температуры.

Одной из важнейших областей применения кинетической теории является кинетика химических реакций, позволяющая вычислить скорость реакции в зависимости от температуры, давления и других факторов. Всякая химическая реакция представляет собой перегруппировку частиц, участвующих в реакции, от конфигурации, соответствующей исходным веществам, до конфигурации, соответствующей продуктам реакции. Такая перегруппировка требует энергии, которая называется энергией активации. Скорость химических реакций сильно растет с увеличением температуры, и тем сильнее, чем больше энергия активации. Кинетическая теория рассматривает как химические реакции, в которых каждый элементарный акт перегруппировки атомов не зависит от другого, так и такие, в которых осуществление одного элементарного акта влечет за собой еще один или несколько элементарных актов. Реакции второго типа называются цепными. К ним относятся реакции, происходящие под действием света, так называемые фотохимические, реакции горения, полимеризации и др.

КИПЕНИЕ

Кипение — процесс перехода *жидкости* в пар, характеризующийся, в отличие от *испарения*, тем, что образование пара происходит не только на поверхности, но и по всей массе жидкости. Кипение становится возможным, если *давление* насыщенных паров жидкости делается равным внешнему давлению. Поэтому данная жидкость, находясь под данным внешним давлением, кипит при вполне определенной темпе-

ратуре. Обычно температуру кипения приводят для атмосферного давления. Например, при атмосферном давлении вода кипит при 373 К или 100° С.

Температура кипения — характерный признак жидкости. Самой низкой температурой кипения обладает жидкий гелий (4,215 К); водород кипит при 20 К, кислород — при 90 К, хлор — при 239 К, цинк — при 1179 К, железо — при 3145 К. Из простых веществ самой высокой температурой кипения обладают рений — 5900 К, вольфрам — 5640 К и тантал — 5560 К. Различие температур кипения различных веществ находит применение в технике для разгонки смесей, компоненты которых сильно отличаются по температурам кипения, например для разгонки нефтепродуктов. При увеличении давления, под которым находится жидкость, ее температура кипения повышается; при уменьшении давления — понижается. Поэтому, например, на вершине Эвереста вода кипит при 72° С.

Пузырьки, образующиеся при кипении жидкости, легче всего возникают на пузырьках воздуха или других газов, обычно присутствующих в жидкости. Такие пузырьки — центры кипения — чаще всего прилипают к стенкам сосуда, поэтому кипение раньше начинается у стенок. Но если жидкость свободна от газов, то образование в ней пузырьков пара затруднено. Такую жидкость можно перегреть, т. е. нагреть выше температуры кипения без того, чтобы она вскипела. Если в такую перегретую жидкость ввести ничтожное количество газа или твердых частичек, к поверхности которых прилип воздух, то она мгновенно и очень бурно закипает. Температура жидкости при этом падает до температуры кипения. Подобные явления могут служить причиной взрыва паровых котлов, и их нужно предупреждать.

КОЛЕБАНИЯ

Все разнообразие типов *движений*, возможных в природе, можно разделить на два широких класса в зависимости от того, происходят ли они в окрестности некоторого среднего положения или такого положения не имеют. К движениям первого класса, называемым *колебаниями*, относятся движение маятника часов, движение поршня двигателя автомобиля и т. д. Ко второму классу можно отнести полет стрелы, выпущенной из лука, падение капель дождя, движение *элементарных частиц* в линейном ускорителе.

Вообще говоря, колебательным движением называют любое движение, которое в той или иной степени обладает свойством повторяемости. Однако в физике обычно изучается более узкий класс колебаний, называемых п е р и о д и ч е с к и м и. Это такие колебания, при которых значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний, повторяются через равные промежутки времени.

П е р и о д о м к о л е б а н и я T называется

«КИПЕНИЕ» ГАЗИРОВАННОЙ ВОДЫ

Для того чтобы процесс кипения проходил спокойно, в сосуд с нагреваемым раствором обычно помещают кипелки — кусочки стеклянной трубки, мрамора и т. п. Несоблюдение этого правила может привести к тому, что жидкость перегревается и тогда случайно возникшая неоднородность вызовет бурное образование пара, а иногда маленький взрыв. Поэтому во время опытов с перегретой жидкостью лучше не рисковать, а воспользоваться моделью — обычной газированной водой. Эта вода насыщена углекислым газом, и образование в ней пузырьков CO_2 аналогично образованию пузырьков пара.

Итак, налейте воду в стакан, подождите, пока не опадет пена и в воде будут подниматься вверх только отдельные пузырьки, хотя жидкость все еще содержит достаточно много газа. Для того чтобы ускорить его выход, надо образовать центры кипения, например, бросив в стакан щепотку сахарного песка. Эффекта кипения можно добиться, помешав воду. В этом случае образование пузырьков идет на неоднородностях, возникающих в жидкости.

Возьмите ягодку или кусочек шоколада и бросьте в стакан. Достигнув дна, они обрастут образующимися на их поверхности пузырьками и всплывут. Пузырьки выходят в воздух, и кусочек шоколада снова опускается на дно. Иногда этот процесс всплывания и погружения происходит десятки раз.

Выходящие пузырьки выносят с собой и растворенные в жидкости другие газы. Это свойство часто используется в физике и технике, при этом газ, образующий пузырьки (газ-носитель), совсем не обязательно CO_2. Так, в опытах с солнечным *нейтрино* использовался поток пузырьков гелия, которые выносили из большой цистерны с жидкостью десятую часть кубика аргона вместе с радиоактивным аргоном, образовавшимся под действием солнечных нейтрино.

тот наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебательное движение. За время, равное периоду, происходит одно полное колебание. Для того чтобы решить обратную задачу — выяснить, сколько полных колебаний произошло в единицу времени, вводят понятие частоты колебаний $\nu = 1/T$, которая измеряется в герцах. Математически зависимость от времени какой-нибудь колеблющейся величины F описывается периодической функцией времени: $F = F_0 + f(t)$, где $F_0 = \text{const}$, а $f(t)$ — периодическая функция времени.

Наиболее простой тип колебаний — так называемые гармонические колебания, при которых изменение физической величины со временем происходит по гармоническому (синусоидальному) закону:

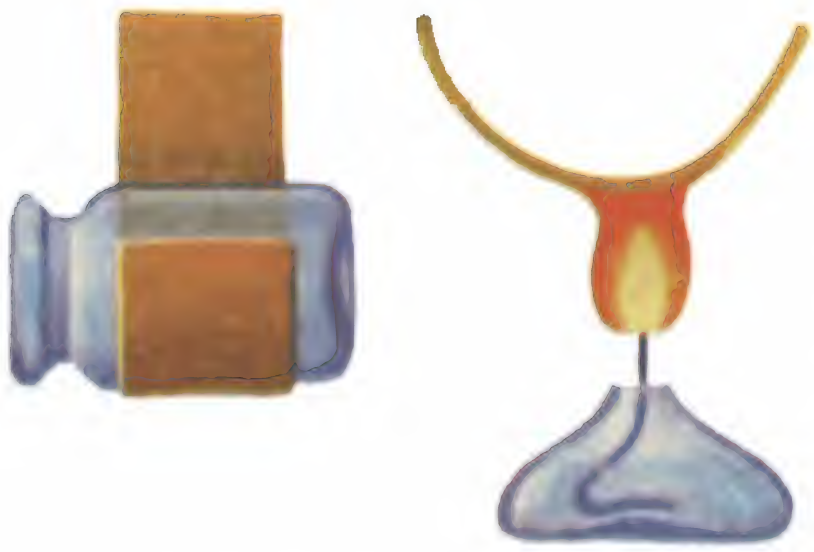
$$F(t) = F_0 + A \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Величина A характеризует максимальный размах колебаний и называется амплитудой колебания, а угол φ — его начальной фазой. Важная характеристика гармонического колебания — его циклическая частота ω, которая зависит от физических свойств колеблющейся системы и определяет период колебания: $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

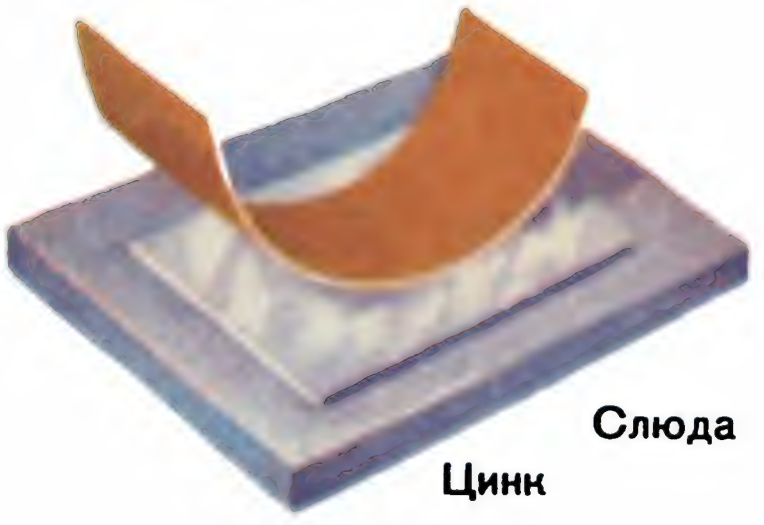
Оказывается, что любое колебание достаточно малой амплитуды вблизи положения равновесия системы происходит по гармоническому закону. Это и малые колебания маят-

КОЛЕБАНИЯ ДУГИ

Проделаем два опыта, каждый из которых, во всяком случае на первый взгляд, кажется совершенно удивительным. Описание первого из них было опубликовано в журнале Русского физико-химического общества А. С. Поповым — выдающимся ученым, изобретателем радио. Ставился он следующим образом.



Дуга из латуни



Слюда

Цинк

На толстую пластинку из цинка или дюраля кладется тонкий, около 0,1 мм толщиной, листок слюды. Затем полоска листовой латуни размером 20×150×1 мм сгибается по дуге окружности (шаблоном может служить стеклянная банка).

Если нагреть латунную полоску и положить ее на слюду так, как это показано на рисунке, она начинает совершать колебания и колеблется довольно долго. Ясно, что здесь механическая энергия берется за счет тепловой, но как осуществляется этот процесс?

«Слюда, нагреваемая только с одной стороны, вспучивается в сторону нагретого тела и приподнимает его слегка, вследствие этого в соприкосновение с нагретым телом приходят новые точки на поверхности слюды, а прежде нагретые остывают от соседства с холодным телом. Дуга наклоняется в одну сторону до тех пор, пока тяжесть не преодолеет образующейся таким образом движущей силы...» (А. С. Попов).

СОЛЯНОЙ МАЯТНИК

Среди многих опытов, которые можно поставить по теме «Колебания», один из наиболее интересных — колебания, возникающие при смешивании жидкостей с различной плотностью. Для изготовления соляного маятника потребуются два прозрачных сосуда: большой (можно использовать стеклянную банку), наполненный чистой водой, и малый (прозрачная бутылочка из пластика), в котором содержится концентрированный раствор поваренной соли. Раствор надо подкрасить чернилами.

В дне малого сосуда предварительно проделывается отверстие диаметром около 3 мм и затыкается пробкой. Если теперь погрузить этот сосуд в банку с водой и осторожно вынуть пробку, то жидкость поведет себя необычным образом. Сначала в воду попадет струйка окрашенного солевого раствора. Затем его движение прекратится, и в растворе забьет фонтанчик чистой воды. Потом снова настанет очередь тяжелой жидкости. Путем таких колебаний будет происходить смешивание жидкостей, и при этом за довольно продолжительное время. Таким образом возвращается к устойчивому состоянию первоначально неустойчивая система.

ника, и колебания грузика на пружине, и электромагнитные колебания в *LC*-контуре радиоприемника. Все эти и многие другие системы, в которых колебания происходят по гармоническому закону, носят название *гармонических осцилляторов*.

Колебания разделяются на свободные (собственные) и вынужденные. Свободными называются колебания, происходящие после начального выведения системы из равновесного положения без всякого внешнего периодического воздействия. Так, колебания маятника в поле тяжести Земли являются свободными. Если же на маятник действует периодически меняющаяся внешняя сила, то в конце концов ему придется «забыть» о собственной частоте колебаний $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{g}{l}}$ и покорно следовать за вынуждающей силой с ее частотой ω. Такие колебания называются вынужденными. Если частота вынуждающей силы оказывается близкой к собственной частоте свободных колебаний системы, то возникает интересное и практически важное явление *резонанса*, при котором даже малая по величине вынуждающая сила приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний системы.

По своей физической природе могут быть выделены различные виды колебаний: а) механические (колебания маятника, моста, корабля на волне, струны); б) электромагнитные (колебания в колебательном контуре, объемном резонаторе, волноводе); в) электромеханические (колебания мембраны телефона, пьезокварцевого или магнитострикционного излучателя ультразвука); г) химические (колебания концентрации реагирующих веществ при так

называемых периодических химических реакциях); д) термодинамические и другие тепловые автоколебания, встречающиеся в акустике, а также в некоторых типах реактивных двигателей.

Таким образом, колебания охватывают огромную область физических явлений и технических процессов. В частности, колебания имеют первостепенное значение в судостроении, самолетостроении, электротехнике, технике автоматического регулирования. На их использовании основана вся радиотехника и техническая акустика.

Колебаниям различной физической природы присущи некоторые характерные закономерности. Вследствие этого возникла область физики — теория колебаний, занимающаяся исследованием этих закономерностей.

Раскачивается маятник старинных часов. Корабль качается на волнах. Карета движется по неровной дороге. Гитара в руках музыканта рождает мелодию. Атомы движутся в кристалле. Что общего во всех этих примерах? — Здесь везде мы имеем дело с колебательным движением. Совершают колебания маятник часов, корабль на волнах, карета на рессорах, струна гитары, атомы в кристаллической решетке. Колебания очень распространены в окружающем нас мире. Они могут быть не только механическими (как в приведенных примерах), но и электромагнитными и др.

КОМПТОНА ЭФФЕКТ

Американский физик А. Комптон в 1920 г. начал изучать рассеяние *рентгеновских лучей* графитом и другими телами. Узкий пучок излучения, выделяемый диафрагмами $Д_1$ и $Д_2$, падал на кусок вещества, а рассеянное под углом Θ излучение попадало на кристалл К, отклоняющий рентгеновские лучи с разной длиной волны на разные углы (рис. 1). На фотопластинке рентгеновское излучение с длиной волны λ дает линию. Если механизм взаимодействия рентгеновского излучения рассматривать как волновой процесс, то отклонившиеся под действием электромагнитного поля атомные электроны начнут колебаться с частотой, равной частоте падающего рентгеновского излучения, и новой линии на пластинке не появится.

Рис. 1. Схема опыта Комптона.

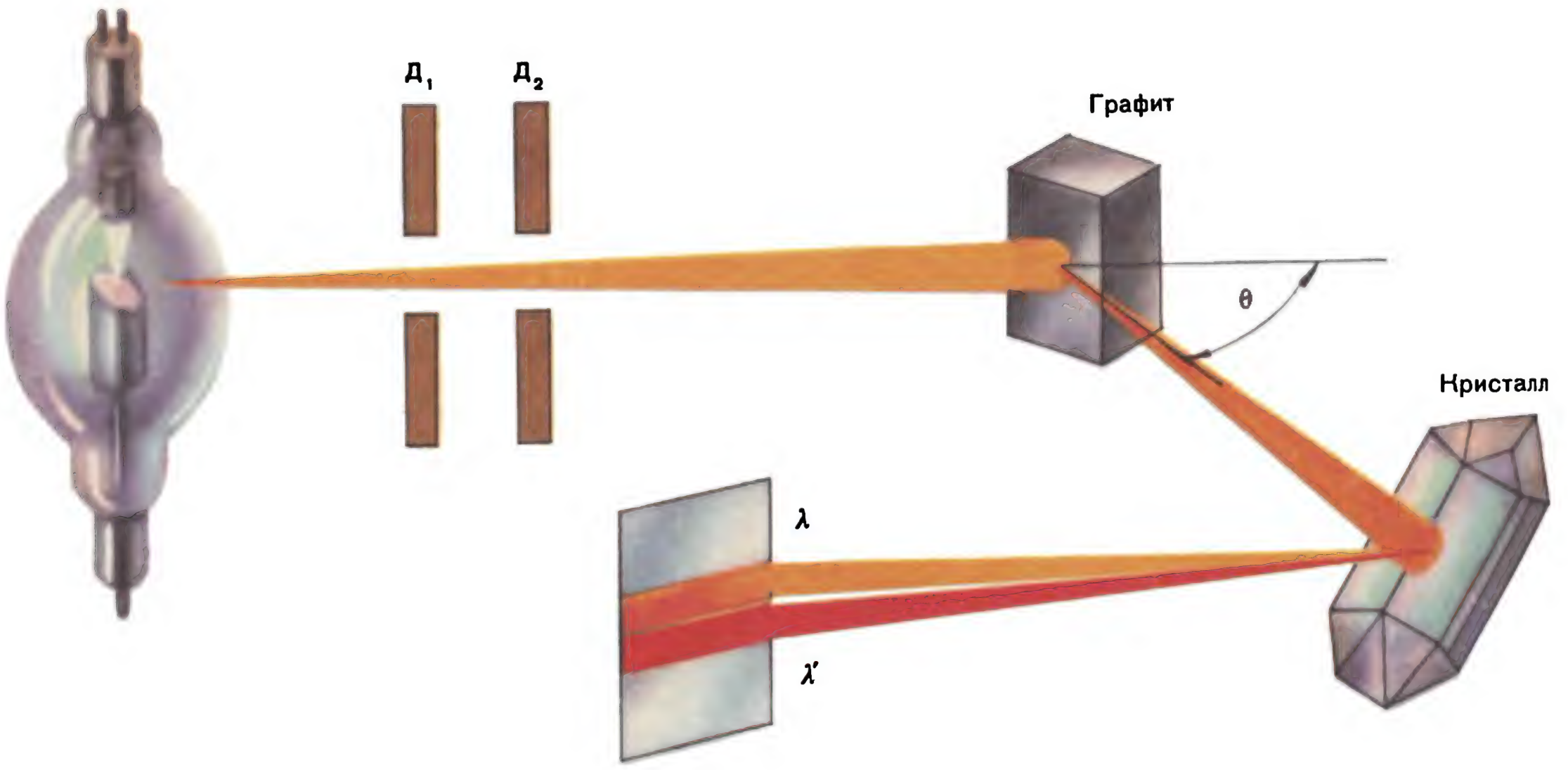
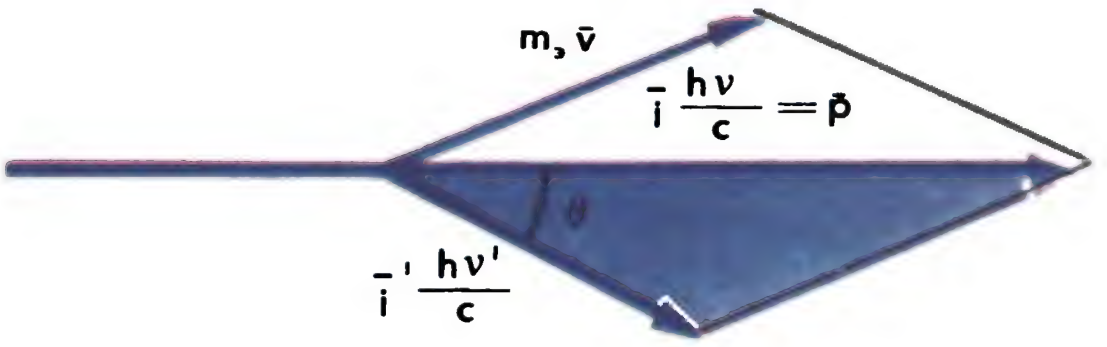


Рис. 2. Векторная диаграмма импульсов падающего на электрон рентгеновского кванта, импульса рассеянного кванта, $\frac{h\nu'}{c}$ и импульса электрона $m_э\bar{v}$.



$$h\nu = \frac{m_э v^2}{2} + h\nu' \qquad \text{Закон сохранения энергии}$$

$$\bar{p} = m_э \bar{v} + \bar{i}' \frac{h\nu'}{c} \qquad \text{Закон сохранения импульса}$$

Но Комптон ожидал другого. И его ожидания оправдались: наряду с линией λ появилась и новая линия λ' с большей длиной волны. Как и предполагал ученый, некоторые рентгеновские кванты теряли часть энергии, отдавая ее атомным электронам, и в результате появилась новая линия λ'. Длины волн отличались на величину $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\pi\ \lambda_0 \sin^2\frac{\Theta}{2}$. Величину $\lambda_0 = h/m_e c$ называют комптоновской длиной волны *электрона* ($2{,}426 \cdot 10^{-10}$ см). Эту зависимость Комптон получил, предположив, что столкновение между рентгеновским квантом с энергией $h\nu$ и импульсом $\frac{h\nu}{c}$ и электроном вещества протекает точно так же, как и столкновение между двумя твердыми шариками: стóит только записать законы сохранения энергии и импульса для «шаров» — и готовы уравнения, необходимые для вычисления $\Delta\lambda$ в зависимости от угла Θ (рис. 2).

Явление изменения длины волны рентгеновских лучей, рассеиваемых электронами, получило название *эффекта Комптона*. Оно стало замечательным подтверждением квантовой природы электромагнитного излучения наряду с уравнением Эйнштейна, описывающим *фотоэффект*. С использованием волновой теории получить связь между $\Delta\lambda$ и углом Θ не удавалось. Результаты Комптона были проверены с помощью камеры Вильсона (см. *Детекторы ядерных излучений*).

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего четверть века минуло со дня запуска в 1957 г. первого искусственного спутника Земли, но за этот короткий срок космические исследования сумели занять одно из ведущих мест в мировой науке. Ощутив себя гражданином

Вселенной, человек, естественно, захотел лучше узнать свой мир и его окружение.

Уже первый спутник передал ценную информацию о свойствах верхних слоев *атмосферы* Земли, об особенностях прохождения радиоволн через *ионосферу*. Второй спутник положил начало целому научному направлению — космической биологии: на его борту в космос впервые отправилось живое существо — собака Лайка. Третий орбитальный полет советского аппарата снова посвящался Земле — исследованию ее атмосферы, магнитного поля, взаимодействия воздушной оболочки с солнечным излучением, метеорной обстановки вокруг планеты.

После первых запусков стало ясно, что исследование космоса должно вестись целенаправленно, по долгосрочным научным программам. В 1962 г. в Советском Союзе начались запуски автоматических спутников серии «Космос», число которых в настоящее время приближается уже к 2 тыс. Спутники «Космос» выводятся на близкие и далекие от Земли орбиты, оснащаются научными приборами для изучения ближайших окрестностей планеты и многообразных явлений в верхней атмосфере и околоземном космическом пространстве.

Спутники «Электрон» и орбитальные автоматические обсерватории «Прогноз» рассказали о Солнце и его определяющем влиянии на земную жизнь. Изучая наше светило, мы постигаем также тайны далеких звезд, знакомимся с работой естественного термоядерного реактора, построить который на Земле пока не удается. Из космоса увидели и «невидимое солнце» — его «портрет» в ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучах, которые не доходят до поверхности Земли из-за непрозрачности атмосферы в этих участках спектра *электромагнитных волн*. Кроме спутников-автоматов длительные исследования Солнца вели советские и американские космонавты на орбитальных космических станциях.

Благодаря исследованиям из космоса мы лучше узнали состав, строение и свойства верхних слоев атмосферы и ионосферы Земли, зависимость их от солнечной активности, что позволило повысить надежность прогноза погоды и условий радиосвязи.

«Космический глаз» позволил не только по-новому оценить «внешние данные» нашей планеты, но и заглянуть в ее недра. С орбит лучше обнаруживаются геологические структуры, прослеживаются закономерности строения земной коры и размещения нужных человеку минералов.

Спутники позволяют в считанные минуты просмотреть и огромные акватории, передать их снимки специалистам-океанологам. С орбит получают информацию о направлениях и скорости ветров, зонах зарождения циклонических вихрей.

С 1959 г. началось изучение спутника Земли — Луны — с помощью советских автоматических станций. Станция «Луна-3», облетев Луну, впервые сфотографировала ее обратную сторону; «Луна-9» осуществила мягкую посадку на спутник Земли. Чтобы иметь более ясное представление о всей Луне, необходимы были

Главный конструктор космических кораблей С. П. Королев и первый летчик-космонавт Ю. А. Гагарин.

длительные наблюдения с орбит ее искусственных спутников. Первый из них — советская станция «Луна-10» — был запущен в 1966 г. Осенью 1970 г. к Луне ушла станция «Луна-16», которая, вернувшись на Землю, привезла с собой образцы пород лунного грунта. Но только длительные систематические исследования лунной поверхности могли помочь селенологам разобраться в происхождении и строении нашего естественного спутника. Такую возможность вскоре предоставили им самоходные советские научные лаборатории — луноходы. Результаты космических исследований Луны предоставили новые данные и об истории происхождения Земли.

Характерные особенности советской программы изучения планет — планомерность, последовательность, постепенное усложнение решаемых задач — особенно ярко проявились в исследованиях Венеры. Два последних десятилетия принесли больше сведений об этой планете, чем весь предыдущий более чем трехвековой период ее изучения. При этом значительная часть информации добыта советской наукой и техникой. Спускаемые аппараты автоматических межпланетных станций «Венера» не раз совершали посадки на поверхность планеты, зондировали ее атмосферу и облака. Советские станции стали и первыми искусственными спутниками Венеры.

4 октября 1957 года весь мир, затаив дыхание, слушал сообщение из Москвы о запуске первого искусственного спутника Земли. С тех пор прошло немногим более четверти века. За это время запущено около двух тысяч искусственных спутников, были совершены многочисленные запуски пилотируемых космических кораблей и автоматических межпланетных станций. Человек вышел в открытый космос, ступил на поверхность Луны, зондировал атмосферу Венеры, познакомился с ее поверхностью, получил снимки поверхностей Меркурия, Марса, Юпитера, Сатурна. Началась эра космических исследований.

Начиная с 1962 г. производится запуск советских автоматических межпланетных станций к планете Марс.

Космонавтика изучает и более удаленные от Земли планеты. Сегодня можно рассматривать телевизионные изображения поверхности Меркурия, Юпитера, Сатурна и их спутников.

Астрономы, получившие в свое распоряжение космическую технику, естественно, не ограничились изучением лишь Солнечной системы. Их приборы, вынесенные за пределы атмосферы, непрозрачной для коротковолновых космических излучений, нацелились в сторону других звезд и галактик.

Идущие от них невидимые лучи — радиоволны, ультрафиолетовое и инфракрасное, рентгеновское и гамма-излучение — несут ценнейшую информацию о том, что происходит в глубинах Вселенной (см. *Астрофизика*).

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Задолго до того, как утечка электричества через воздух стала проблемой для проектировщиков линий электропередач, некоторые физики увлеклись загадкой непонятной электропроводности воздуха. Сперва несовершенные приборы — электроскопы с листочками, а затем и более надежные электрометры с нитями неизменно теряли свой начальный заряд, причем скорость этой утечки явно возрастала при подъеме прибора на аэростате. Решающий эксперимент австрийского ученого В. Гесса (1913) доказал, что именно из космоса приходит какое-то проникающее излучение, разбивающее молекулы воздуха на заряженные ионы.

В 1927 г. советский физик Д. В. Скобельцын обнаружил в камере Вильсона с магнитным полем (см. *Детекторы ядерных излучений*) отдельные следы, а затем и группы быстрых заряженных частиц, почти не искривляемых магнитным полем. Новые эксперименты других ученых не оставили сомнений в том, что именно заряженные частицы очень высоких энергий (порядка миллиардов электронвольт) были «виновниками» и высокой проникающей способности, и необычных превращений при взаимодействии космических лучей с веществом.

Американский ученый К. Д. Андерсон с помощью камеры Вильсона увидел в 1932 г. правило, *протоны*, прилетающие из космоса в положительно заряженный аналог *электрона* атмосферу Земли и при последовательных e^- — п о з и т р о н e^+ (см. *Антивещество*), а в 1936 г. — в 200 раз более тяжелую, но неустойчивую частицу — мюон μ. «Ассортимент» основных частиц *ядерной физики* сильно обогатился в 1947 г., когда английский физик С. Ф. Пауэлл с сотрудниками открыл с помощью ядерных фотоэмульсий главного «предка» мюона заряженный пион $\pi^{\pm}$ с массой 274 электронных массы и характерной цепочкой распадов $\pi \to \mu(+\nu) \to e(+2\nu)$, где ν — непосредственно ненаблюдаемые нейтральные частицы (рис. 1).

Изучение неустойчивости ряда частиц со сравнительно медленным, по масштабам микромира, распадом (за 10^{-6}—10^{-10} с) привело к созданию теории *слабых взаимодействий,* объяснившей и свойства самой проникающей, почти неуловимой частицы — *нейтрино* ν.

Своеобразие свойств всех новых частиц проявилось в процессах их рождения и последующих превращений. Так, позитрон создается гамма-квантом высокой энергии (γ-квантом) (см. *Гамма-излучение*) всегда в паре с электроном в сильном электрическом поле *атомного ядра*; сами γ-кванты возникают за счет рождения и распада нейтральной разновидности пиона π°, и они же излучаются электронами и позитронами при торможении в поле ядра. «Прародителями» этих частиц являются, как правило, *протоны*, прилетающие из космоса в

Рис. 1. Одна из первых микрофотографий распада пиона на мюон, а затем на позитрон.

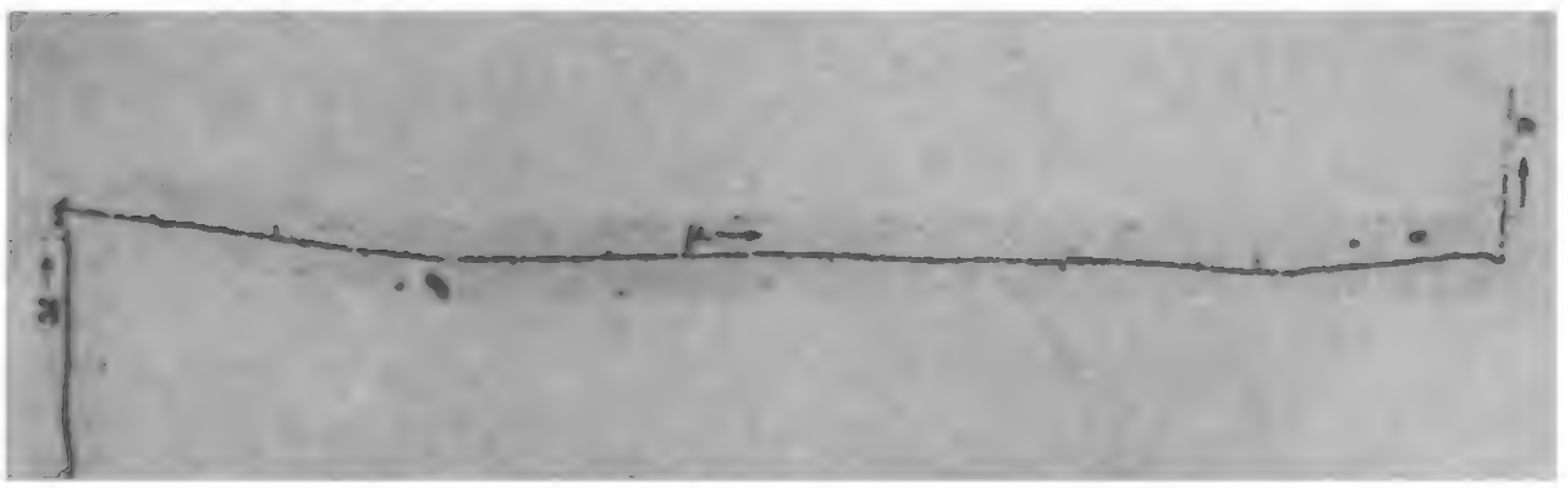
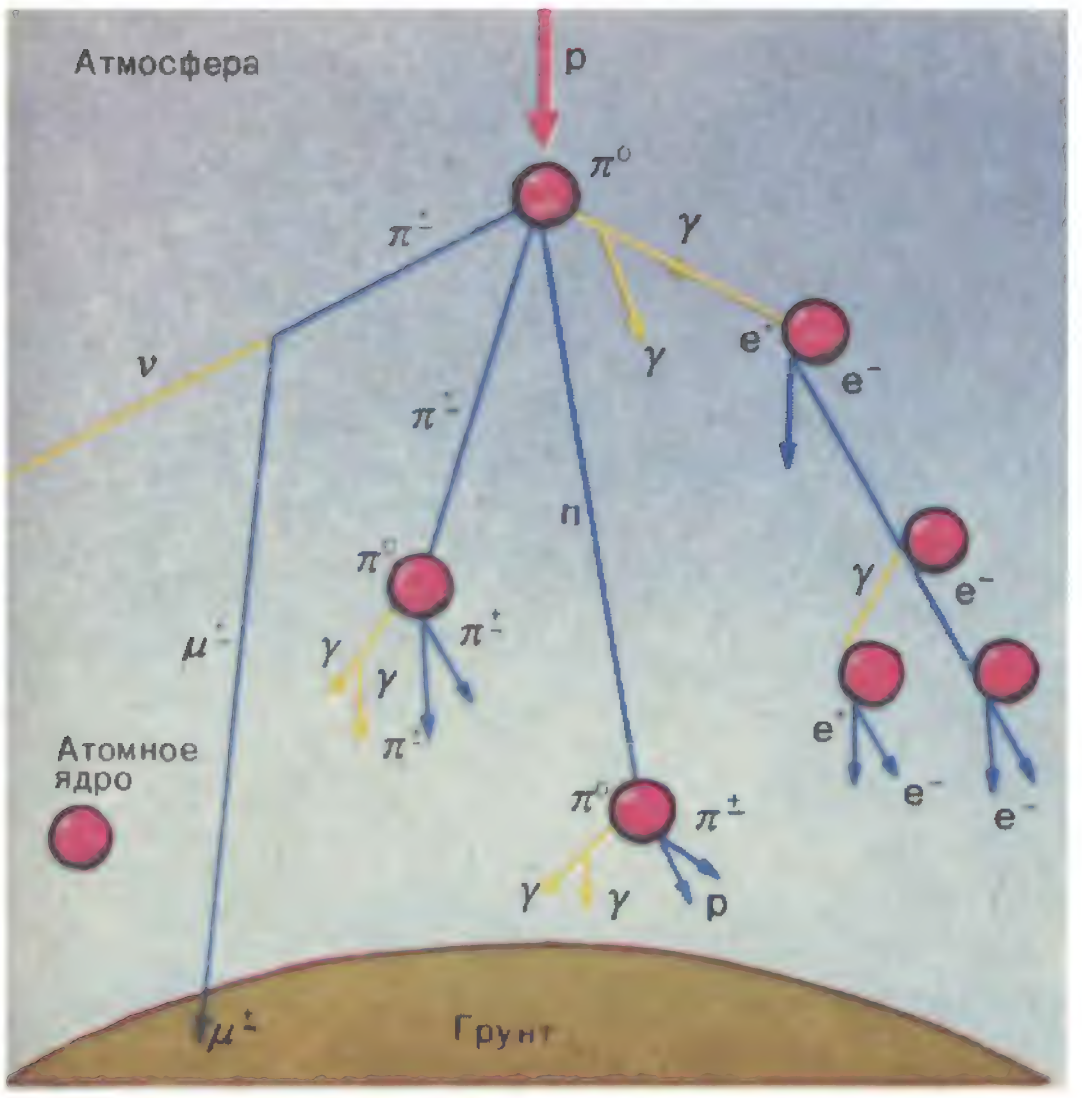


Рис. 2. Фотография множественного рождения частиц в камере Вильсона.

Рис 3. Развитие ядерно-каскадного процесса в атмосфере: p — протон; n — нейтрон, π — пионы; μ — мюоны; e^-, e^+ — электрон и позитрон; γ — гамма-квант, ν_e — нейтрино



столкновениях с атомными ядрами рождающие каждый раз целый «веер» пионов, заряженных и нейтральных (рис. 2). Такое множественное рождение частиц связано с их *сильным взаимодействием*, которое примерно в 100 раз интенсивнее электромагнитного взаимодействия.

На рис. 3 показана в общих чертах схема ядерно-каскадного процесса, при котором образуются три основные компоненты вторичного космического излучения: ядерно-активная (*протоны* и *нейтроны* из ядер + пионы), проникающая, или жесткая (мюоны), и мягкая (электронно-фотонная). При очень высоких энергиях ($> 10^{14}$ эВ) каскадные процессы развиваются настолько интенсивно, что все их «продукты» образуют так называемый широкий атмосферный ливень — поток из миллионов частиц, «орошающий» участок земли в несколько квадратных километров.

К концу 1940-х гг. был изучен энергетический спектр и состав первичного излучения. Оказалось, что его поток, хотя и быстро убывает с ростом энергии (почти по квадратичному закону), все еще простирается до огромных энергий — порядка 10^{20} эВ.

Уникальная проникающая способность космических лучей используется иногда для прикладных целей — для «просвечивания» больших толщ грунта, рудных тел и пустот, а также массивных сооружений в поисковой и инженерной геологии.

Большая научная ценность изучения космических лучей состоит в определении их первичного ядерного состава (который в общих чертах повторяет состав химических элементов во Вселенной), а также их вариаций в пространстве и времени. Попытки установить происхождение этих частиц привели астрофизиков к познанию ряда процессов их ускорения в очень сильных и протяженных электромагнитных полях вокруг уникальных космических тел — сверхновых звезд, пульсаров (т. е. быстро вращающихся нейтронных звезд), «черных дыр» и т. д. (см. *Астрофизика*). Ведутся наблюдения источников космических лучей по приходящим от них электромагнитным излучениям широкого диапазона — от радиоволн до гамма-квантов сверхвысокой энергии.

КОСМОЛОГИЯ

Космология — раздел *астрофизики*, изучающий строение и эволюцию Вселенной в целом.

Современная космология возникла в начале нашего века. В это время стали использоваться новые крупные телескопы, получили развитие астрофотография и *спектроскопия*. Успехи наблюдательной астрономии позволили определить скорости движения далеких звездных систем — галактик и измерить расстояния до них, выяснив тем самым распределение и движение вещества во Вселенной в больших масштабах. Позже возникли новые методы астрофизических исследований — радиоастрономия, рентгеновская астрономия, гамма-астрономия и другие, расширившие наши представления о Вселенной. С другой стороны, важных успехов достигла физика. А. Эйнштейн обобщил закон всемирного *тяготения* на случай сильных гравитационных полей и быстрых движений. Только после такого обобщения стало возможно применять теорию тяготения ко всей Вселенной. Успехи *теоретической* и *экспериментальной физики* помогли понять процессы, изучаемые астрофизикой.

Данные астрофизических наблюдений показывают, что крупнейшими структурными единицами Вселенной являются большие скопления и сверхскопления галактик. Их размеры достигают десятков миллионов парсек (1 пс $= 3 \cdot 10^{18}$ см). В еще больших масштабах (сотни мегапарсек) вещество во Вселенной распределено однородно, т. е. если представить себе куб столь большого размера, то, где бы его ни поместить в пространстве, в нем будет примерно одинаковое число скоплений галактик.

В середине 20-х гг. советский математик А. А. Фридман построил математическую модель Вселенной с однородным распределением вещества, в которой все направления одинаковы. При однородном распределении вещества единственная действующая на него сила — это сила тяготения. Из-за действия сил тяготения вещество Вселенной не может находиться в покое, и Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. В конце 20-х гг. американский астрофизик Э. Хаббл установил,

Вооруженный научными знаниями, человеческий разум успешно проникает сегодня как в глубь атомов и молекул, так и в просторы Вселенной. Исследования строения и развития Вселенной в целом положили начало новому направлению в астрофизике — космологии.

что галактики (а как выяснилось впоследствии, и скопления галактик) удаляются друг от друга, в том числе и от нашей Галактики. Это означает, что Вселенная расширяется. Так был установлен факт глобальной эволюции всей Вселенной.

Будет ли расширение Вселенной неограниченно продолжаться в будущем? Расширение тормозится силами тяготения. Тяготение определяется средней плотностью вещества во Вселенной. Поэтому, будет ли расширение продолжаться вечно, или тяготение его остановит и Вселенная начнет сжиматься, зависит от того, велика ли средняя плотность вещества. Расчет показывает, что при современной скорости расширения (около 75 км/с для галактик, удаленных друг от друга на миллион парсек) критическое значение плотности, при котором расширение в будущем сменится сжатием, равно 10^{-29} г/см^3. Средняя плотность вещества из наблюдений известна не очень надежно. Она, по-видимому, раз в десять меньше критической, и Вселенная будет всегда расширяться. Но окончательный ответ на этот вопрос дадут будущие наблюдения (см. *Материя*).

Так, в последнее время выяснилось, что, возможно, во Вселенной очень много невидимого вещества. Это могут быть, например, тяжелые нейтроны или какие-либо другие частицы. В этом случае окажется, что основная масса материи во Вселенной невидима и полная плотность вещества близка к критической.

Согласно теории Эйнштейна, распределение и движение вещества влияют на геометрические свойства *пространства*. Оказывается, что если плотность вещества Вселенной больше критической, то в модели Фридмана объем пространства Вселенной конечен, если же плотность меньше критической, то объем бесконечен.

Наблюдения показывают, что галактики удаляются друг от друга, значит, в прошлом

они были расположены теснее, а еще раньше не могло быть отдельных галактик и вообще отдельных небесных тел. Вещество было распределено почти равномерно, а плотность его была очень большой. Вселенная начала расширяться примерно 15—20 млрд. лет назад. При этом никакого центра расширения не было. Все точки во Вселенной равноправны. Что было до начала расширения Вселенной, пока до конца не выяснено, так как при очень больших плотностях материи вступают в действие еще неизвестные нам законы природы.

Наблюдениями установлено, что в начале расширения вещество имело очень высокую температуру. Доказательством этому служит наблюдаемое электромагнитное излучение, пронизывающее всю Вселенную и имеющее тепловой спектр, соответствующий температуре 2,7 К. Это излучение является остатком — «реликтом» (поэтому излучение называют реликтовым) той эпохи, когда вещество Вселенной было плотной горячей *плазмой*, непрозрачной для излучения. С расширением Вселенной вещество и излучение остыли.

В самом начале расширения в очень горячей плазме (с температурой больше десятков миллиардов градусов) происходили бурные реакции между *элементарными частицами*. В то время температуры были настолько высоки, что никаких сложных *атомных ядер* быть не могло, они бы моментально были разбиты энергичными частицами. Спустя 3 минуты после начала расширения температура во Вселенной упала примерно до миллиарда градусов, и стали происходить *ядерные реакции* объединения *протонов* (ядер атома водорода) и *нейтронов* в ядра атомов гелия. В результате после 5 минут расширения плазма Вселенной состояла на 30% из ядер атомов гелия и на 70% из ядер атомов водорода. Ядерные реакции к этому времени затухали, и химический состав плазмы остается неизменным с тех пор, вплоть до нашего времени. Наблюдения показывают, что самые старые звезды, действительно, состоят на 70% из водорода и на 30% из гелия.

После окончания ядерных реакций в начале расширения Вселенной плазма продолжала остывать. Спустя миллион лет температура ее упала примерно до 4000 К. В эту эпоху произошло превращение плазмы в нейтральный газ — *электроны* захватывались *атомными ядрами*. Этот процесс называют рекомбинацией. До этого периода плазма была непрозрачна для реликтового излучения. После рекомбинации газ стал прозрачным. Данный факт имеет большое значение для дальнейшей эволюции Вселенной. До рекомбинации давление реликтового излучения в непрозрачной плазме мешало силам *тяготения* собирать вещество в отдельные сгустки и образовывать небесные тела и их системы. После рекомбинации нейтральный газ стал прозрачен для излучения, его давление не противодействует силам тяготения, и эти силы заставляют расти маленькие первоначально сгущения. Процесс роста сгущений очень долгий, но в конце концов в эпоху, уже близкую к нашей, из этих сгустков образовались скопления галактик, галактики, звезды и другие небесные тела.

Таковы в общих чертах современные представления о структуре и эволюции Вселенной. Перед космологией стоят новые задачи. Предстоит решить важную проблему — узнать, почему началось расширение Вселенной, что было до этого, как образовались галактики, и много других проблем. Здесь в ближайшее время следует ожидать интересных открытий.

КРИСТАЛЛОФИЗИКА

Мир кристаллов — удивительный мир многогранников, привлекающих совершенством и красотой геометрических форм. Это — кристаллы обычной поваренной соли и драгоценные камни, кварц, слюда, кристаллы многих горных пород. Но красота и правильность внешней огранки не обязательные свойства кристаллов.

Главное, что их внутреннее строение подчиняется строгим законам симметрии. Так, любой кусок металла состоит из маленьких кристалликов, и в каждом атомы расположены в пространстве строго периодически.

Центры атомов образуют кристаллическую решетку, которая состоит из повторяющихся частей. Ее можно разбить на совершенно одинаковые параллелепипеды, сдвинутые параллельно по отношению друг к другу (рис. 1). Это важнейшее свойство кристаллов называется трансляционной симметрией (трансляция — парал-

Рис. 1. Кристаллическая решетка атомов двух сортов (голубых и сиреневых).

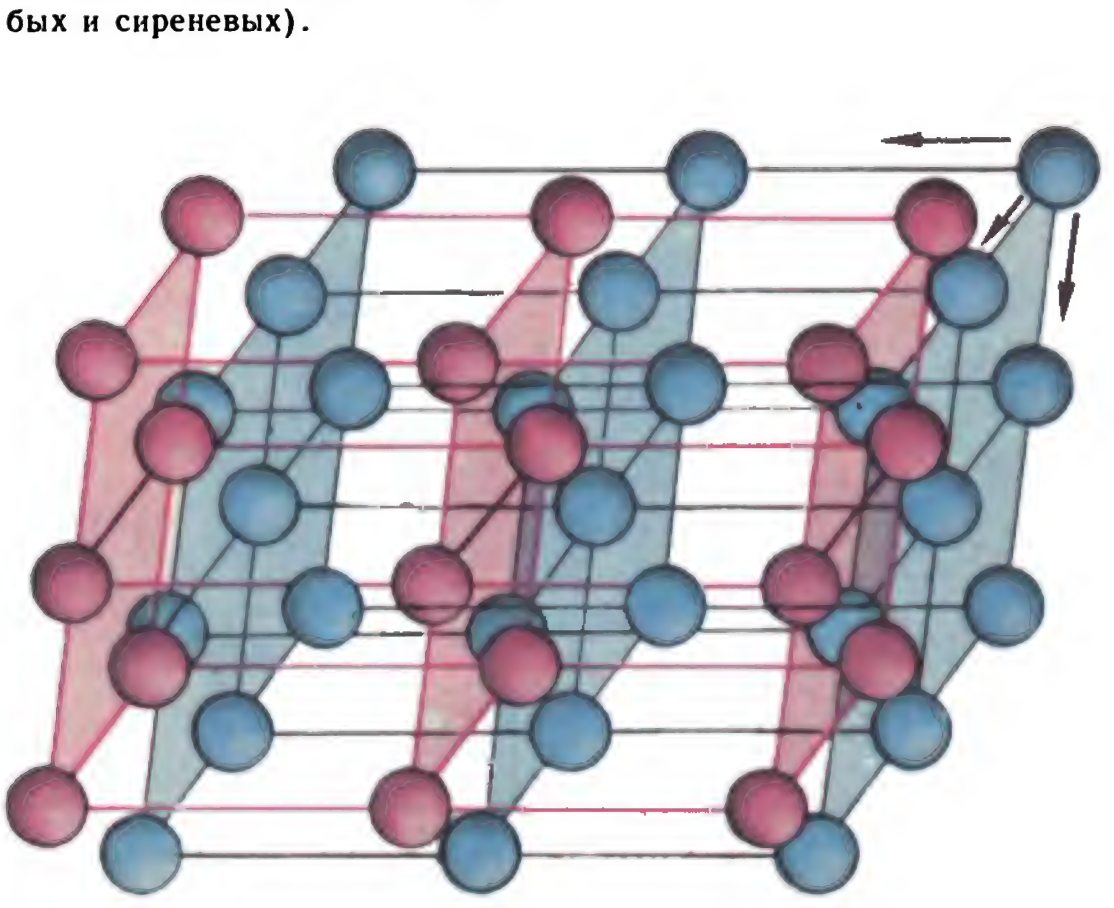


Рис. 2. Семь кристаллических систем.

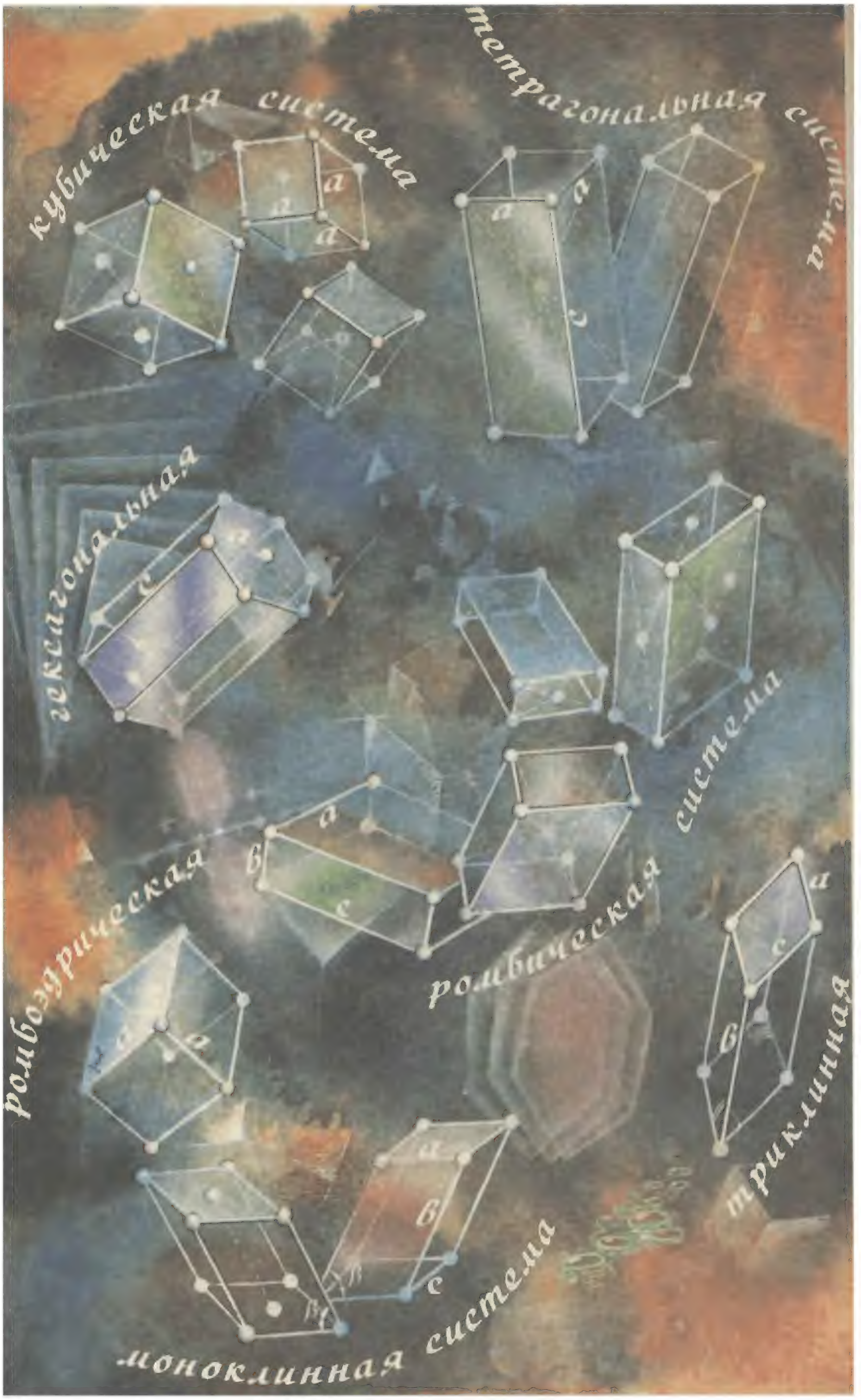


Рис. 3. Кристаллическая решетка графита.

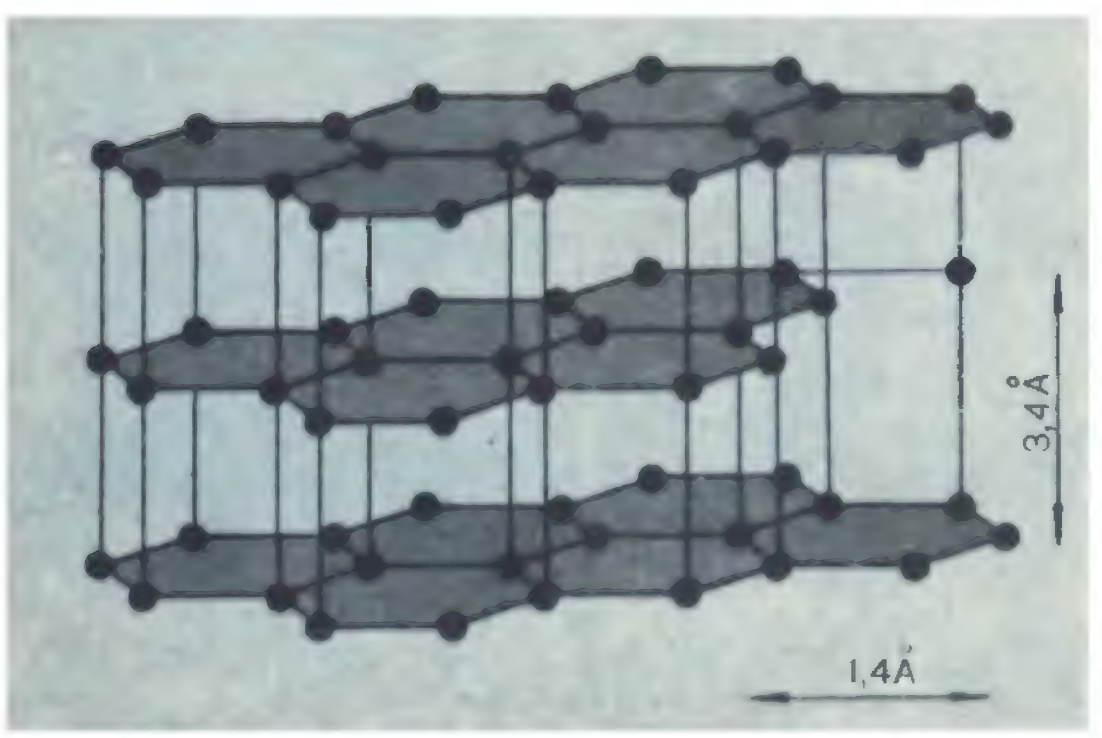


Рис. 5. Кристаллическая решетка алмаза.

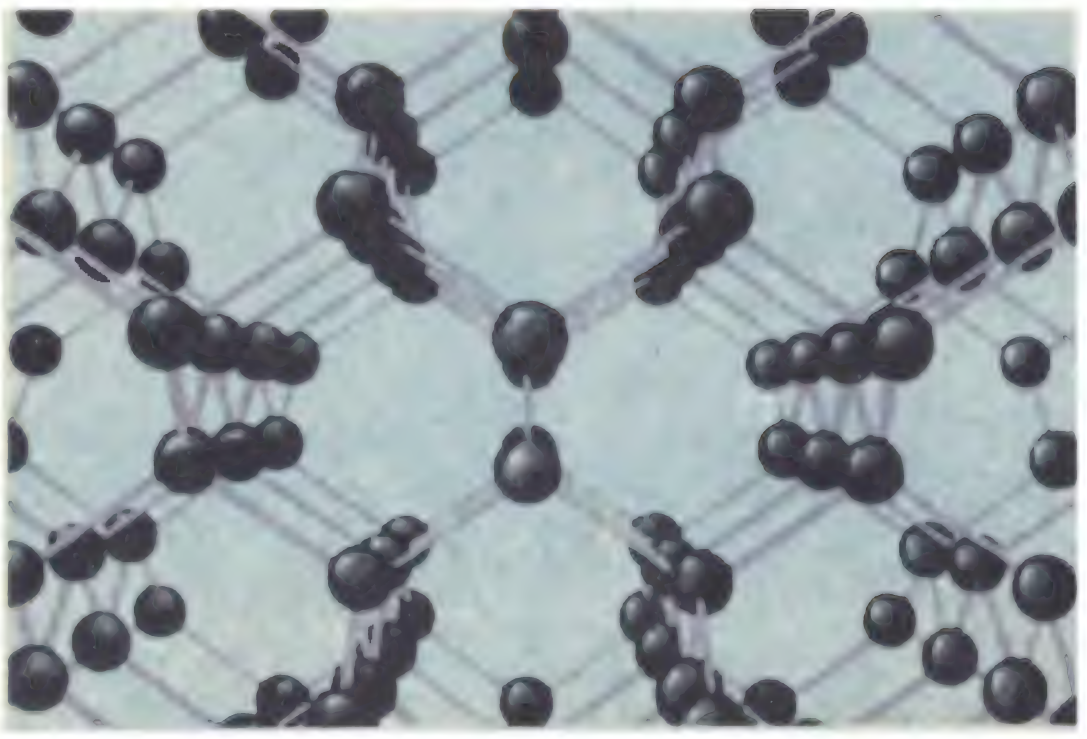
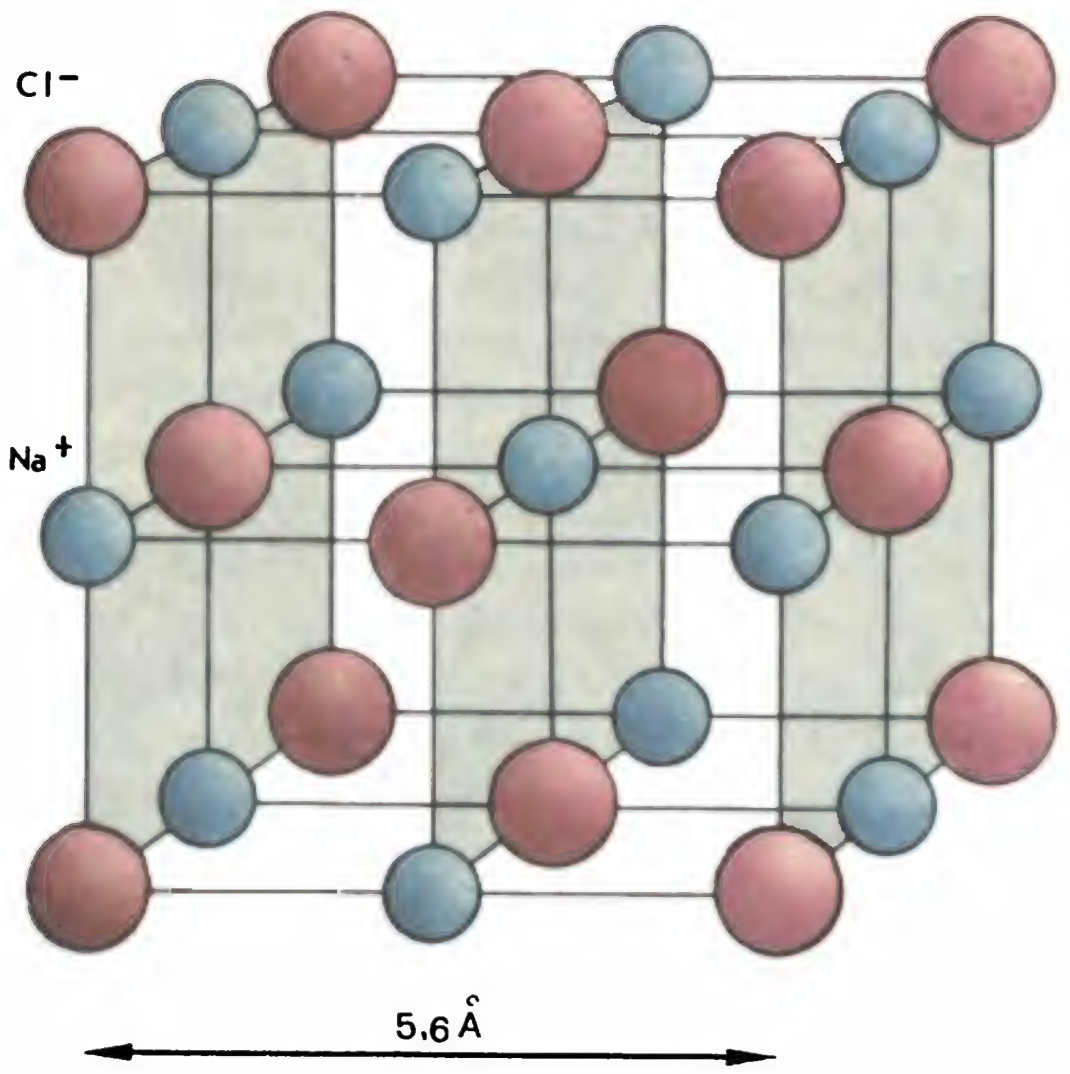


Рис. 4. Кристаллическая решетка каменной соли.



лельный перенос в пространстве на определенное расстояние).

Такое устройство кристаллов впервые описал в 1783 г. французский аббат Р. Ж. Аюи. Он заметил, что любой кристалл исландского шпата можно разбить на равные ромбоэдры. Предположение о том, что форма снежинок — следствие особого расположения частиц, из которых они состоят, высказал еще в 1611 г. немецкий ученый И. Кеплер.

Наименьший параллелепипед, из которого можно составить всю кристаллическую решетку, называют э л е м е н т а р н о й я ч е й к о й. В простейшем случае (например, если бы кристалл на рис. 1 состоял только из сиреневых атомов) достаточно считать, что в ней находится один атом, чтобы с помощью последовательных трансляций (они показаны стрелками) получить весь кристалл. Однако у более сложных кристаллов каждая элементарная ячейка содержит два или даже несколько атомов. В таком случае можно представить себе, что кристалл состоит из нескольких простых решеток (с одним атомом в элементарной ячейке), вложенных одна в другую (решетка сиреневых и голубых атомов на рис. 1).

Простейшие кристаллические решетки, все атомы которых можно получить трансляциями только одного атома, называют р е ш е т к а м и Б р а в е. Такое название дано в честь французского морского офицера О. Браве, впервые построившего в XIX в. теорию трехмерных решеток.

Существует сравнительно небольшое число типов решеток Браве. Они образуют к р и с т а л л и ч е с к и е с и с т е м ы (рис. 2). Наиболее симметричная кубическая система состоит из простой, объемно-центрированной и гранецентрированной кубических решеток. Кроме трансляционной симметрии такие решетки обладают теми же элементами симметрии, что и обычный куб (например, осями симметрии, вокруг которых можно поворачивать кристалл, совмещая его с самим собой).

Однако типы решеток Браве не исчерпывают разнообразия свойств симметрии реальных кристаллов. Ведь решетки Браве еще можно вставить одна в другую! В результате элементы симметрии могут объединяться в различных комбинациях, образуя так называемые п р о с т р а н с т в е н н ы е г р у п п ы. Всего имеется 230 различных групп. Все они были найдены

Рис. 6. Ионы металлов подобны маленьким шарикам, упакованным с максимальной плотностью. Один из способов упаковки обеспечивает кубическая гранецентрированная решетка.

Рис. 7. Второй способ упаковки шаров — гексагональная решетка.

в 1890 г. русским ученым Е. С. Федоровым.

Зачем нужно знать симметрию внутреннего строения кристалла, тип его кристаллической решетки? Оказывается, это совершенно необходимо для практического использования кристаллов. В каких направлениях кристалл самый прочный? Как он лучше всего проводит электрический ток? Как расширяется кристалл по разным направлениям? Соображения симметрии помогают дать ответы на эти вопросы.

Графит, например, имеет гексагональную решетку, состоящую из вытянутых вдоль высоты призм (рис. 3), и поэтому легко стирается в направлении слоев.

Соображения симметрии легко позволяют ответить, почему металлы, обладающие кубической решеткой, одинаково расширяются по всем направлениям. Ведь при расширении кристалл должен оставаться кубическим, а его решетка — подобной самой себе (интересно, что понятие кристаллической решетки ввел в науку в 1824 г. немецкий физик Л. Зеебер именно для объяснения теплового расширения кристаллов).

Со строением кристаллической решетки тесно связаны и магнитные свойства вещества. Например, в ферромагнетиках (см. *Магнетизм*) домены стремятся ориентироваться вдоль некоторых кристаллографических направлений — осей легкого намагничивания (у железа, которое имеет кубическую решетку, это ребра куба).

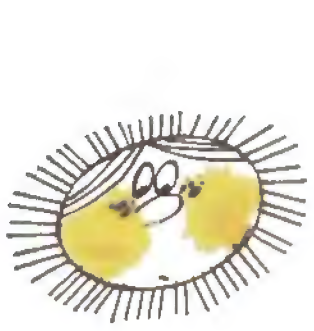
Даже если кристалл состоит из множества мелких кристалликов (поликристалл), строение кристаллической решетки влияет на многие его свойства (например, сжимаемость, температуру плавления и т. п.).

Кристаллическая решетка никогда не бывает идеальной. Она содержит пустые узлы (вакансии), примесные атомы, *дислокации*. Кроме того, атомы (или ионы), из которых состоит решетка, совершают тепловые колебания.

Любопытно, что колебания атомов в кристаллах не вымерзают и при абсолютном нуле. *Квантовая механика* никогда не позволяет частицам остановиться в каком-то месте, и они совершают нулевые колебания. Амплитуда этих колебаний тем больше, чем легче атомы и чем слабее взаимодействие между ними. Легкий инертный газ гелий вообще не кристаллизуется при абсолютном нуле (нулевые колебания разрушают кристаллическую решетку). Гелий — единственное вещество, которое не замерзает при абсолютном нуле температур, не превращается в твердое тело. Правда, если создавать давление ~ 30 ат, то образуется кристалл твердого гелия. Но это совершенно особый кристалл. Он обладает поистине удивительными свойствами. Например, его грани могут совершать гигантские колебания. Если вырастить кристалл так, чтобы он заполнил часть ампулы, то достаточно качнуть прибор, и граница между твердым и жидким гелием «оживает» и по ней бегут волны. Такие, как их называют, квантовые кристаллы существуют лишь при температурах вблизи абсолютного нуля.

Современная кристаллофизика дает полную геометрическую картину строения реальных кристаллов (этот раздел науки часто называют кристаллографией). Однако почему именно так вырастает тот или иной кристалл, чаще всего объяснить не удается. При росте

ОБРАЗОВАНИЕ И РОСТ КРИСТАЛЛОВ



Часто образование и рост кристаллов наблюдают с помощью микроскопа. Если его нет, можно воспользоваться сильной лупой. Возьмите небольшое плоское стеклышко и положите на него щепотку кристаллов гипосульфита (это вещество используется в фотографии) или салола. Стеклышко надо медленно нагревать, держа его над лампой. При температуре около 50° С кристаллы плавятся. Нельзя допускать, чтобы жидкость кипела. Сняв стеклышко, закройте его другим, предварительно подогретым стеклом и наблюдайте в лупу за появлением и ростом кристаллов. Можно осторожно ввести в щель между стеклами кристаллик вещества и наблюдать, как вокруг него растут другие кристаллы.

Тот же эффект дает иголка, введенная в расплав. Кристаллы создают красивый узор между стеклами. Этот узор можно спроецировать на экран, используя диапроектор.

Для выращивания относительно большого кристалла чаще всего используют квасцы (полное название — алюмокалиевые квасцы, химическая формула — $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$). Это довольно распространенное в быту и совершенно безвредное вещество. Сделайте насыщенный раствор квасцов при температуре 30° С. Профильтруйте его через фильтровальную бумагу и налейте в чистую банку. В центре банки на нитке надо подвесить по возможности большой кристалл тех же квасцов — затравку. Если оставить банку открытой на несколько дней, то из затравки вырастет крупный кристалл. Обычно опыт удается не сразу, но проявив настойчивость, можно научиться выращивать крупные и красивые кристаллы.

кристалла атомы находятся в непрерывном тепловом движении и, перебирая разные возможности, как-то находят свое место в кристалле, отвечающее минимуму *потенциальной энергии*. Общие закономерности, связанные с характером химической связи в решетках, тем не менее имеются.

Простейший тип связи — ионная связь. В узлах кристаллической решетки расположены заряженные ионы, и электростатическое (кулоновское) взаимодействие связывает частицы в единый кристалл. Таковы, например, кристаллы поваренной соли (рис. 4). Ионные кристаллы обычно имеют структуру, обеспечивающую для каждого иона большое число ближайших соседей (как говорят, большое координационное число). Легко подсчитать, что в решетке NaCl координационное число равно 6.

Другой тип связи — ковалентная (гомеополярная) химическая связь, т. е. связь такого же типа, как и во многих молекулах. При ее образовании электроны внешних оболочек атомов уже принадлежат обоим атомам. Это приводит к выигрышу энергии по сравнению с энергией изолированных атомов (энергия связи). Число ближайших соседей определяется валентностью атома, а их расположение — наиболее выгодной ориентацией химических связей. Так, например, устроена решетка алмаза (рис. 5).

Наконец, очень важный тип связи — металлическая связь. Она преобладает в *металлах* с хорошей электропроводностью, где имеется много свободных электронов. В таком случае можно представить, что ионный «остов» решетки погружен в электронную «жидкость». Взаимодействие ионов с электронной «жидкостью» обеспечивает связь кристалла.

Ионы металлов при этом подобны маленьким шарикам, упакованным с максимальной плотностью. Они заполняют около 74% пространства, и существует два основных способа упаковать шары подобным образом (рис. 6, 7). Один способ обеспечивает кубическая гранецентрированная решетка (Cu, Al, Au, Ag и др.). Второй — разновидность гексагональной решетки (она называется гексагональной плотной упаковкой). Такой решеткой обладают Mg, Cd, Zn, Ni и др.

Для исследования строения кристаллов используют явление *дифракции рентгеновских лучей* и *нейтронов*.

Возможно также прямое наблюдение кристаллов в электронных микроскопах, которые сейчас позволяют различать даже отдельные *атомы*.

Казалось бы, от холодного порядка в кристаллах так далеко до живой природы. Ведь не зря же Снежная королева в сказке Андерсена заставляла Кая складывать из льдин правильные геометрические узоры, чтобы он забыл о теплых человеческих чувствах. И тем не менее в последнее время становится все более очевидным, что именно законы упорядочения дают ключ к пониманию тайн жизни.

КРУЖКИ ЮНЫХ ФИЗИКОВ

Физический кружок — один из видов внеурочной работы школьников по физике. В таких кружках охотно занимаются учащиеся, особенно интересующиеся физикой. В нашей стране работают десятки тысяч физических кружков в школах, Дворцах и Домах пионеров и школьников.

Формы работы в физических кружках могут быть самыми многообразными: это и проведение экспериментальных исследований, и конструирование и изготовление физических приборов, и работа с научной и научно-популярной литературой, и организация массовых мероприятий.

Известно, что способности человека развиваются только в деятельности. Физический кружок, предоставляя широкие возможности для интересной, разнообразной самостоятельной работы, способствует формированию активной творческой личности.

Цели физического кружка в значительной степени определяются составом его членов. Занятия в кружке помогают пробудить интерес к физике у шестиклассников и семиклассников, школьники начинают лучше понимать тесную связь физической науки с жизнью, производством и сельским хозяйством. Перед учащимися VIII—X классов ставятся более широкие задачи. Старшеклассники знакомятся с методами исследований, применяемыми в физике, учатся работать с измерительными приборами, применяют накопленные знания при создании физических приборов и технических установок. Все это способствует развитию навыков самостоятельной работы, помогает учащимся выбрать будущую специальность.

В физических кружках школьники приучаются работать с научной и научно-популярной литературой, самостоятельно пополнять свои знания, ориентироваться в потоке научной информации.

Для выступлений на занятиях в физическом кружке учащиеся готовят доклады, рефераты на различные темы. В кружке решаются разнообразные задачи по физике. Специальные занятия посвящаются изготовлению приборов, моделей, наглядных пособий, конструированию новых приборов, техническому обслуживанию радиоузла и т. д.

Работа в кружке позволяет применить полученные на уроках теоретические знания в прак-

Школьники на занятиях в кружке юных физиков.

тической деятельности, например при изготовлении приборов и моделей. Изготовление приборов развивает конструкторские способности, умение работать собственными руками, что чрезвычайно важно для действительно глубокого понимания физики. Конструкторская работа требует поисков оптимального решения, творческого преодоления препятствий.

Кружки могут работать или по программе, сопутствующей школьному курсу физики, углубляющей его, или по вопросам, интересующим школьников,

В работе кружков используется система групповых и индивидуальных занятий, так что одни группы конструируют приборы и модели, другие — работают над научно-популярной литературой, готовят доклады, третьи — решают задачи. Это позволяет полнее учесть интересы членов кружка.

Лучшие работы кружковцев отбираются для различного рода выставок технического творчества, для итоговых вечеров или конференций.

Л

ЛАЗЕР

Лазер представляет собой источник монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча. Само слово «лазер» составлено из первых букв английского словосочетания, означающего «усиление света в результате вынужденного излучения».

Действительно, основной физический процесс, определяющий действие лазера,— это вынужденное испускание излучения. Оно происходит при взаимодействии *фотона* с возбужденным *атомом* при точном совпадении энергии фотона с энергией возбуждения атома (или молекулы).

В результате этого взаимодействия возбужденный атом переходит в невозбужденное состояние, а избыток энергии излучается в виде нового фотона с точно такой же энергией, направлением распространения и поляризацией, как и у первичного фотона. Таким образом, следствием данного процесса является наличие уже двух абсолютно идентичных фотонов. При дальнейшем взаимодействии этих фотонов с возбужденными атомами, аналогичными первому атому, может возникнуть «цепная реакция» размножения одинаковых фотонов, «летящих» абсолютно точно в одном направлении, что приведет к появлению узконаправленного светового луча. Для возникновения лавины идентичных фотонов необходима среда, в которой возбужденных атомов было бы больше, чем невозбужденных, поскольку при взаимодействии фотонов с невозбужденными атомами происходило бы поглощение фотонов. Такая среда называется с р е д о й с и н в е р с н о й н а с е л е н н о с т ь ю у р о в н е й э н е р г и и (рис. 1).

Итак, кроме вынужденного испускания фотонов возбужденными атомами происходят также процесс самопроизвольного, спонтанного испускания фотонов при переходе возбужденных атомов в невозбужденное состояние и процесс поглощения фотонов при переходе атомов из невозбужденного состояния в возбужденное. Эти три процесса, сопровождающие переходы атомов в возбужденные состояния и обратно, были постулированы А. Эйнштейном в 1916 г.

Если число возбужденных атомов велико и существует инверсная населенность уровней (в верхнем, возбужденном состоянии атомов больше, чем в нижнем, невозбужденном), то первый же фотон, родившийся в результате спонтанного излучения, вызовет всенарастающую лавину появления идентичных ему фотонов. Произойдет усиление спонтанного излучения.

На возможность давления света в среде с инверсной населенностью за счет вынужденного испускания впервые указал в 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант, предложивший создавать инверсную населенность в электрическом разряде в газе.

При одновременном рождении (принципиально это возможно) большого числа спонтанно испущенных фотонов возникнет большое число лавин, каждая из которых будет распространяться в своем направлении, заданном первоначальным фотоном соответствующей лавины. В результате мы получим потоки квантов света, но не сможем получить ни направленного луча, ни высокой монохроматичности, так как каждая лавина инициировалась собственным первоначальным фотоном. Для того чтобы среду с инверсной населенностью можно было использовать для г е н е р а ц и и лазерного луча, т. е. направленного луча с высокой монохроматичностью, необходимо «снимать» инверсную населенность с помощью первичных фотонов, уже обладающих одной и той же направленностью излучения и одной и той же энергией, совпадающей с энергией данного перехода в атоме. В этом случае мы будем иметь лазерный усилитель света.

Существует, однако, и другой вариант получения лазерного луча, связанный с использованием системы о б р а т н о й с в я з и. На рис. 2 видно, что спонтанно родившиеся фотоны, направление распространения которых не перпендикулярно плоскости зеркал, создадут лавины фотонов, выходящие за пределы среды. В то же время фотоны, направление

Рис. 1. Схематическое изображение среды с инверсной населенностью уровней энергии.

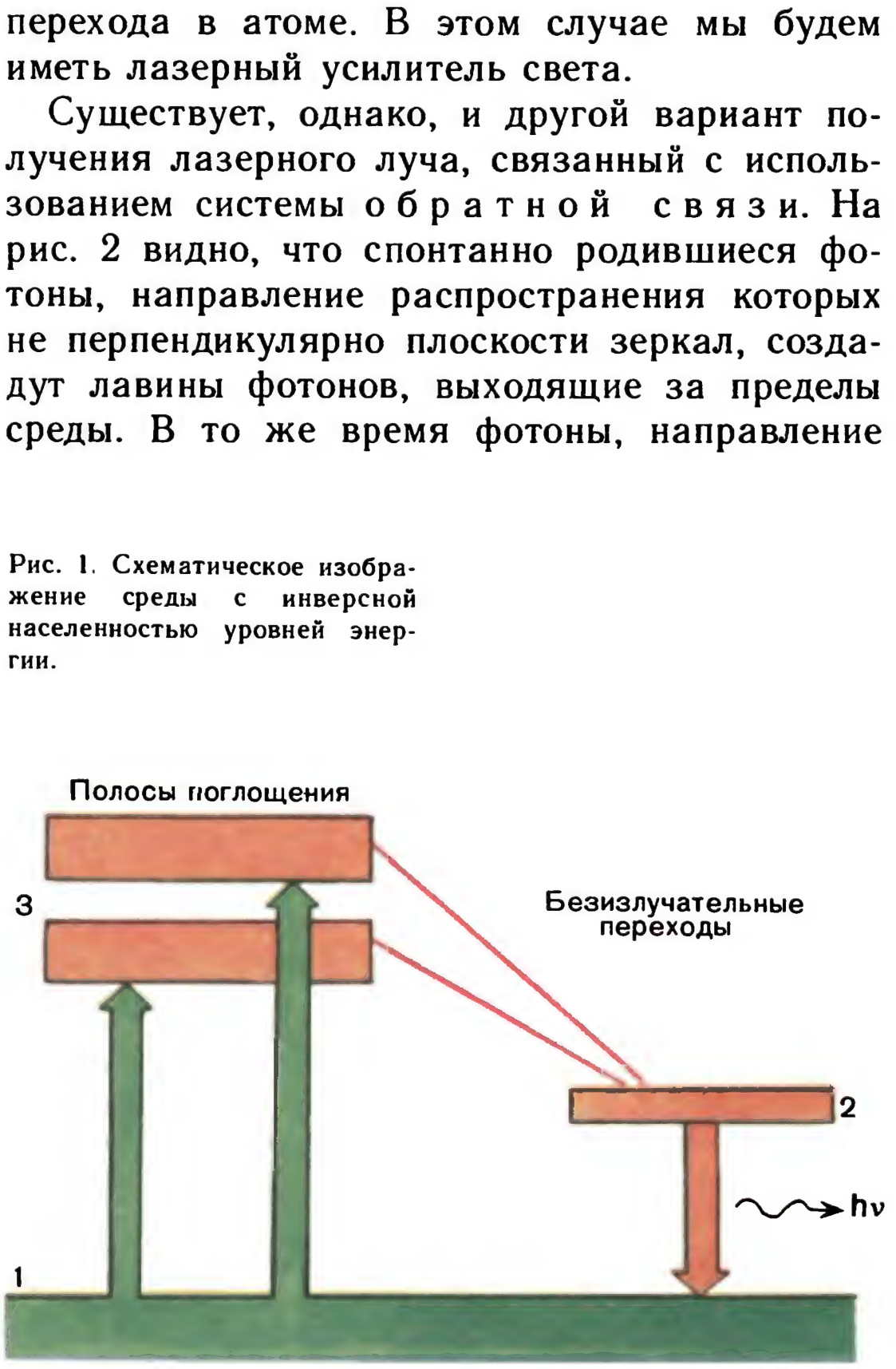
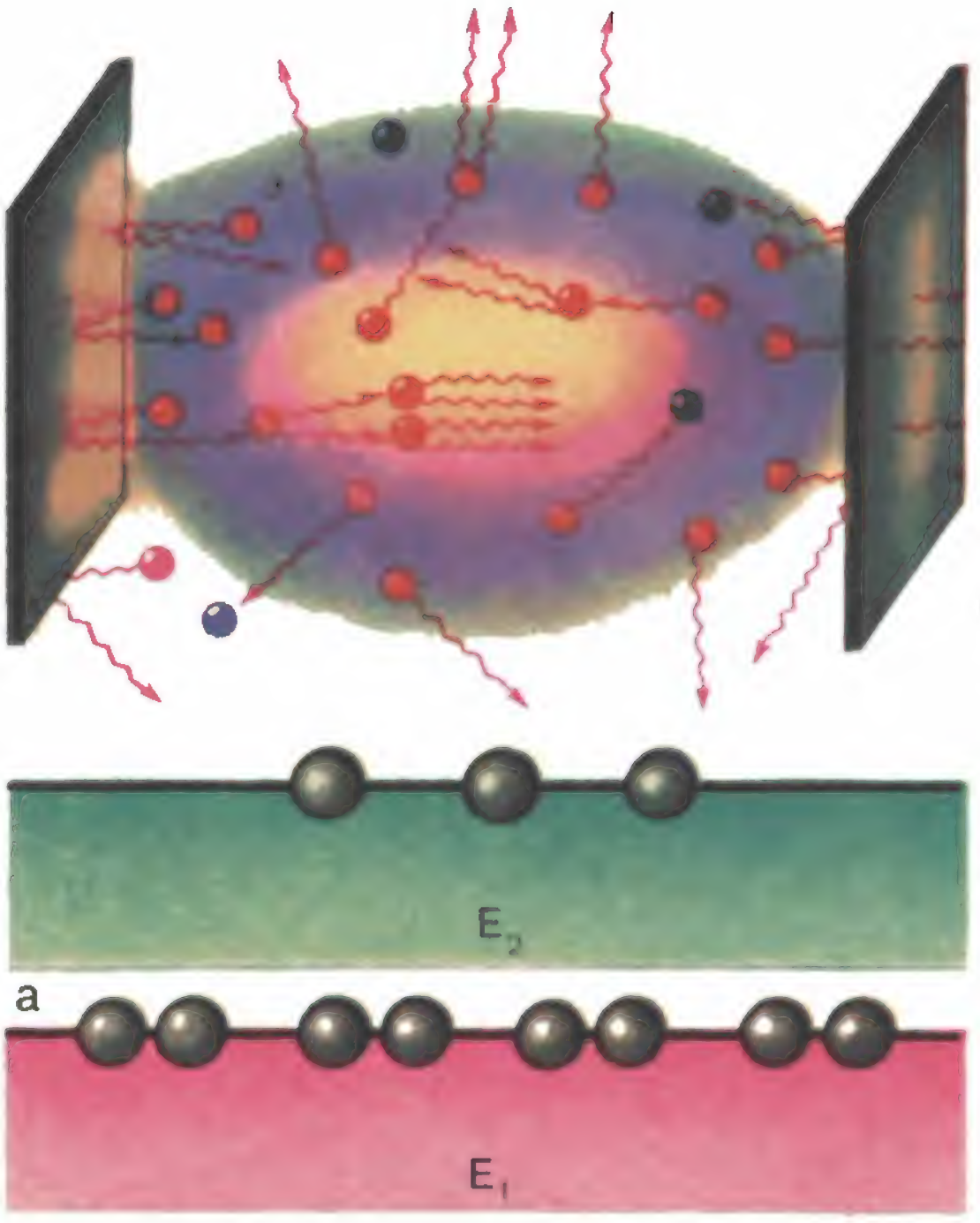


Рис. 2. Спонтанно родившиеся фотоны, направление распространения которых не перпендикулярно плоскости зеркал, создают лавины фотонов, выходящие за пределы среды.

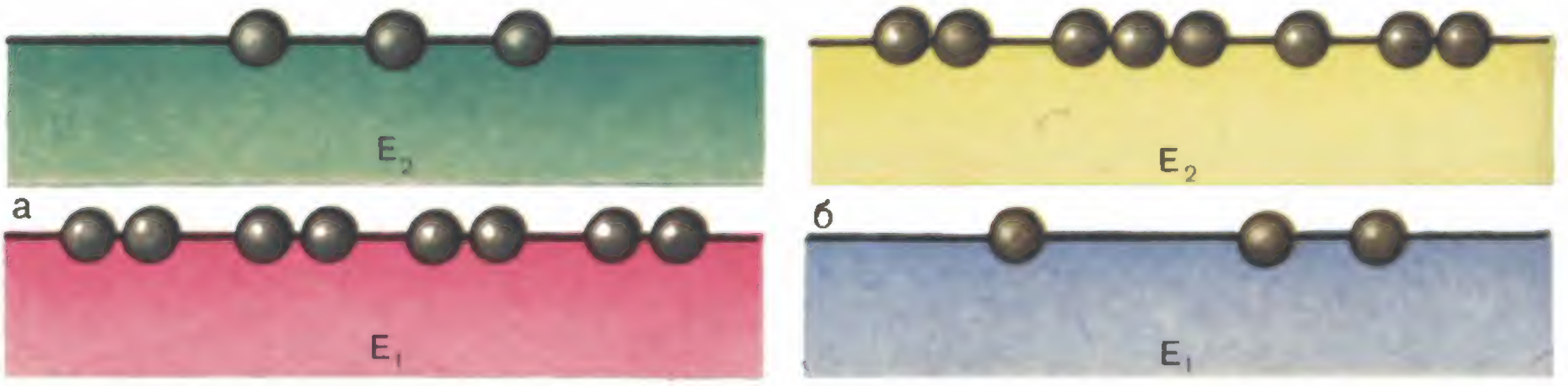


распространения которых перпендикулярно плоскости зеркал, создадут лавины, многократно усиливающиеся в среде вследствие многократного отражения от зеркал. Если одно из зеркал будет обладать небольшим пропусканием, то через него будет выходить направленный поток фотонов перпендикулярно плоскости зеркал. При правильно подобранном пропускании зеркал, точной их настройке относительно друг друга и относительно продольной оси среды с инверсной населенностью обратная связь может оказаться настолько эффективной, что излучением «вбок» можно будет полностью пренебречь по сравнению с излучением, выходящим через зеркала. На практике это, действительно, удается сделать. Такую схему обратной связи называют оптическим резонатором, и именно этот тип резонатора используют в большинстве существующих лазеров.

В 1955 г. одновременно и независимо Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР и Ч. Таунсом в США был предложен принцип создания первого в мире генератора квантов электромагнитного излучения на среде с инверсной населенностью, в котором вынужденное испускание в результате использования обратной связи приводило к генерации чрезвычайно монохроматического излучения.

Спустя несколько лет, в 1960 г., американским физиком Т. Мейманом был запущен первый квантовый генератор оптического диапазона—лазер, в котором обратная связь осуществлялась с помощью описанного выше оптического резонатора, а инверсная населенность возбуждалась в кристаллах рубина, облучаемых излучением ксеноновой лампы-вспышки. Рубиновый кристалл представляет собой кристалл оксида алюминия Al_2O_3 с небольшой добавкой $\simeq 0{,}05\%$ хрома. При добавлении атомов хрома прозрачные кристаллы рубина приобретают розовый цвет и поглощают излучение в двух полосах ближней ультрафиолетовой области спектра. Всего кристаллами рубина поглощается около 15% света лампы-вспышки. При поглощении света ионами хрома происходит переход ионов в возбужденное состояние (рис. 3). В результате внутренних процессов возбужденные ионы хрома переходят в основное состояние не сразу, а через два возбужденных уровня. На этих уровнях происходит накопление ионов и при достаточно мощной вспышке ксеноновой лампы возникает инверсная населенность между промежуточными уровнями и основным уровнем ионов хрома.

Рис. 3. При поглощении света ионами хрома происходит переход ионов в возбужденное состояние.



Торцы рубинового стержня (рис. 4) полируют, покрывают светоотражающими интерференционными пленками, выдерживая при этом строгую параллельность торцов друг другу.

При возникновении инверсии населенностей уровней ионов хрома в рубине происходит лавинное нарастание числа вынужденно испущенных фотонов, и система обратной связи на оптическом резонаторе, образованном зеркалами на торцах рубинового стержня, обеспечивает формирование узконаправленного луча красного света. Длительность лазерного импульса $\sim 10^{-3}$с, немного короче длительности вспышки ксеноновой лампы. Энергия импульса рубинового лазера около 1 Дж.

С помощью механической системы (вращающееся зеркало) или быстродействующего электрического затвора можно «включить» обратную связь (настроить одно из зеркал) в момент достижения максимальной инверсии населенностей и, следовательно, максимального усиления активной среды. В этом случае мощность индуцированного излучения будет

Рис 4. Торцы рубинового стержня строго параллельны друг другу

чрезвычайно велика и инверсия населенности «снимется» вынужденным излучением за очень короткое время.

В этом режиме модулированной добротности резонатора излучается гигантский импульс лазерного излучения. Полная энергия этого импульса останется приблизительно на том же уровне, что и в режиме «свободной генерации», но вследствие сокращения в сотни раз длительности импульса также в сотни раз возрастает мощность излучения, достигая значения $\sim 10^8$ Вт.

Рассмотрим некоторые уникальные свойства лазерного излучения.

При спонтанном излучении атом излучает спектральную линию конечной ширины. При лавинообразном нарастании числа вынужденно испущенных фотонов в среде с инверсной населенностью интенсивность излучения этой лавины будет возрастать прежде всего в центре спектральной линии данного атомного перехода, и в результате этого процесса ширина спектральной линии первоначального спонтанного излучения будет уменьшаться. На практике в специальных условиях удается сделать относительную ширину спектральной линии лазерного излучения в 10^7—10^8 раз меньше, чем ширина самых узких линий спонтанного излучения, наблюдаемых в природе.

Кроме сужения линии излучения в лазере удается получить расходимость луча менее 10^{-4} радиана, т. е. на уровне угловых секунд.

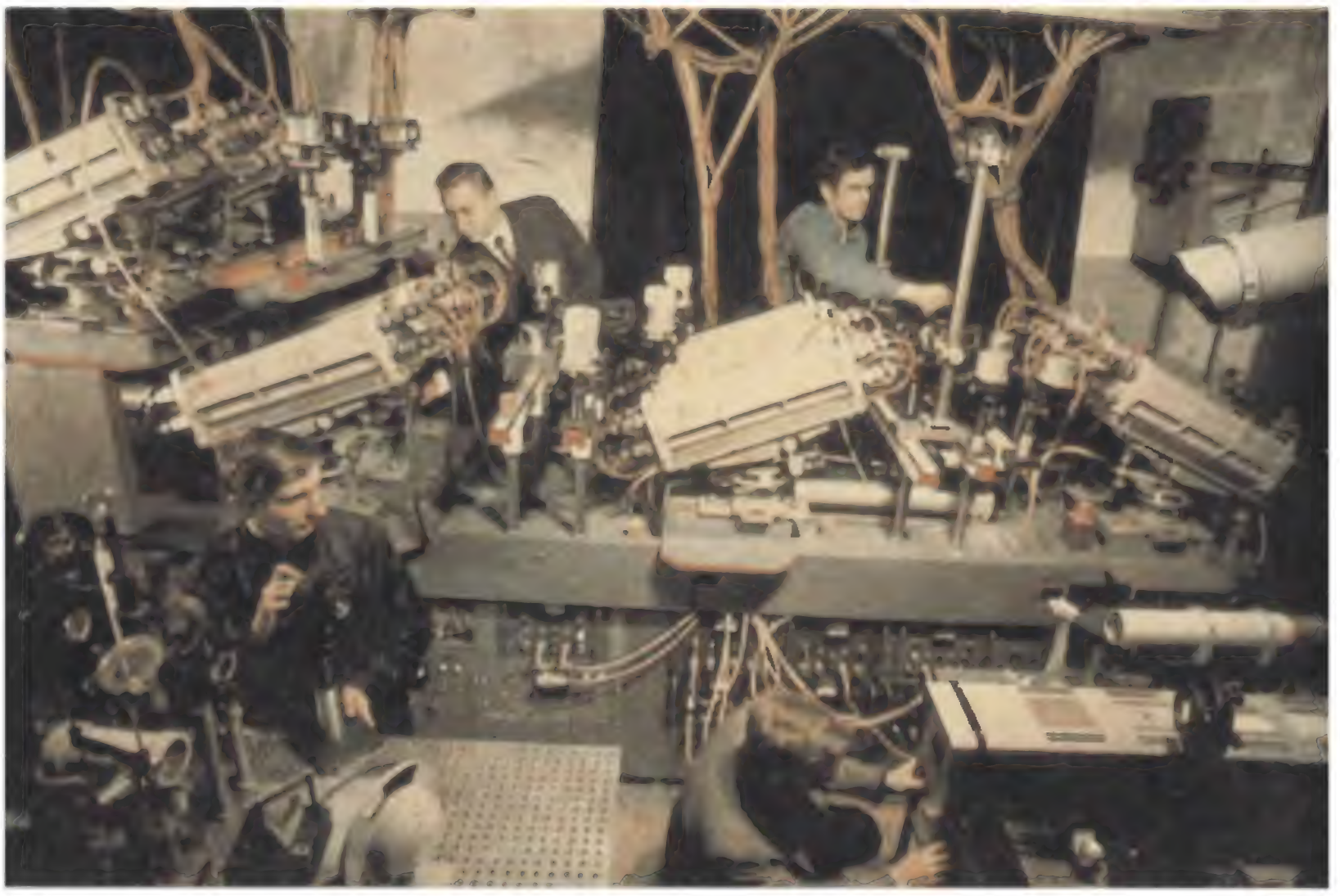
Известно, что направленный узкий луч света можно получить в принципе от любого источника, поставив на пути светового потока ряд экранов с маленькими отверстиями, расположенными на одной прямой. Представим себе, что мы взяли нагретое черное тело и с помощью диафрагм получили луч света, из которого посредством призмы или другого спектрального прибора выделили луч с шириной спектра, соответствующей ширине спектра лазерного излучения. Зная мощность лазерного излучения, ширину его спектра и угловую расходимость луча, можно с помощью формулы Планка вычислить температуру воображаемого черного тела, использованного в качестве источника светового луча, эквивалентного лазерному лучу. Этот расчет приведет нас к фантастической цифре: температура черного тела должна быть порядка десятков миллионов градусов! Удивительное свойство лазерного луча — его высокая эффективная температура (даже при относительно малой средней мощности лазерного излучения или малой энергии лазерного импульса) открывает перед исследователями большие возможности, абсолютно неосуществимые без использования лазера.

В настоящее время созданы лазеры на самых различных средах — газах, жидкостях, стеклах, кристаллах. Об использовании лазеров рассказано в ст. *Лазерная технология.*

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Лазеры нашли широкое применение, и в частности используются в промышленности для различных видов обработки материалов: металлов, бетона, стекла, тканей, кожи и т. п.

Лазерные технологические процессы можно условно разделить на два вида. Первый из них использует возможность чрезвычайно тонкой фокусировки лазерного луча и точного дозирования энергии как в импульсном, так и в непрерывном режимах. В таких технологических процессах применяют лазеры сравнительно невысокой средней мощности: это газовые лазеры импульсно-периодического действия, лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната с примесью неодима. С помощью последних были разработаны технология сверления тонких отверстий (диаметром 1—10 мкм и глубиной до 10—100 мкм) в рубиновых и алмазных камнях для часовой промышленности и технология изготовления фильеров для протяжки тонкой проволоки. Основная область применения маломощных импульсных лазеров связана с резкой и сваркой миниатюрных деталей в микроэлектронике и электровакуумной промышленности, с маркировкой миниатюрных деталей, автоматическим выжиганием цифр, букв, изображений для нужд поли-



В Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР с помощью лазеров изучают физику твердого тела (*вверху*) и физику плазмы (*внизу слева*).

Настройка одного из мощных лазеров в Новосибирском академгородке. Его используют при исследованиях плазмы (*справа*).

графической промышленности.

В последние годы в одной из важнейших областей микроэлектроники—фотолитографии, без применения которой практически невозможно изготовление сверхминиатюрных печатных плат, интегральных схем и других элементов микроэлектронной техники, обычные источники света заменяются на лазерные. С помощью лазера на Xe Cl ($\lambda = 308$ нм) удается получить разрешение в фотолитографической технике до 0,15—0,2 мкм.

Дальнейший прогресс в субмикронной литографии связан с применением в качестве экспонирующего источника света мягкого рентгеновского излучения из плазмы, создаваемой лазерным лучом. В этом случае предел разрешения, определяемый длиной волны рентгеновского излучения ($\lambda \simeq 0{,}01$—$0{,}001$ мкм), оказывается просто фантастическим.

Второй вид лазерной технологии основан на применении лазеров с большой средней мощностью: от 1 кВт и выше. Мощные лазеры используют в таких энергоемких технологических процессах, как резка и сварка толстых стальных листов, поверхностная закалка, наплавление и легирование крупногабаритных деталей, очистка зданий от поверхностных загрязнений, резка мрамора, гранита, раскрой тканей, кожи и других материалов. При лазерной сварке металлов достигается высокое качество шва и не требуется применения вакуумных камер, как при электронно-лучевой сварке, а это очень важно в конвейерном производстве.

Мощная лазерная технология нашла применение в машиностроении, автомобильной промышленности, промышленности строительных материалов. Она позволяет не только повысить качество обработки материалов, но и улучшить технико-экономические показатели производственных процессов. Так, скорость лазерной сварки стальных листов толщиной 14 мкм до-

стигает 100 м/ч при расходе электроэнергии 10 кВт · ч.

С развитием все более мощной лазерной техники энергия лазерного излучения стала все шире использоваться в народном хозяйстве наряду с другими традиционными видами энергии (энергией электрического тока, механической энергией, энергией химических процессов).

ЛЕПТОНЫ

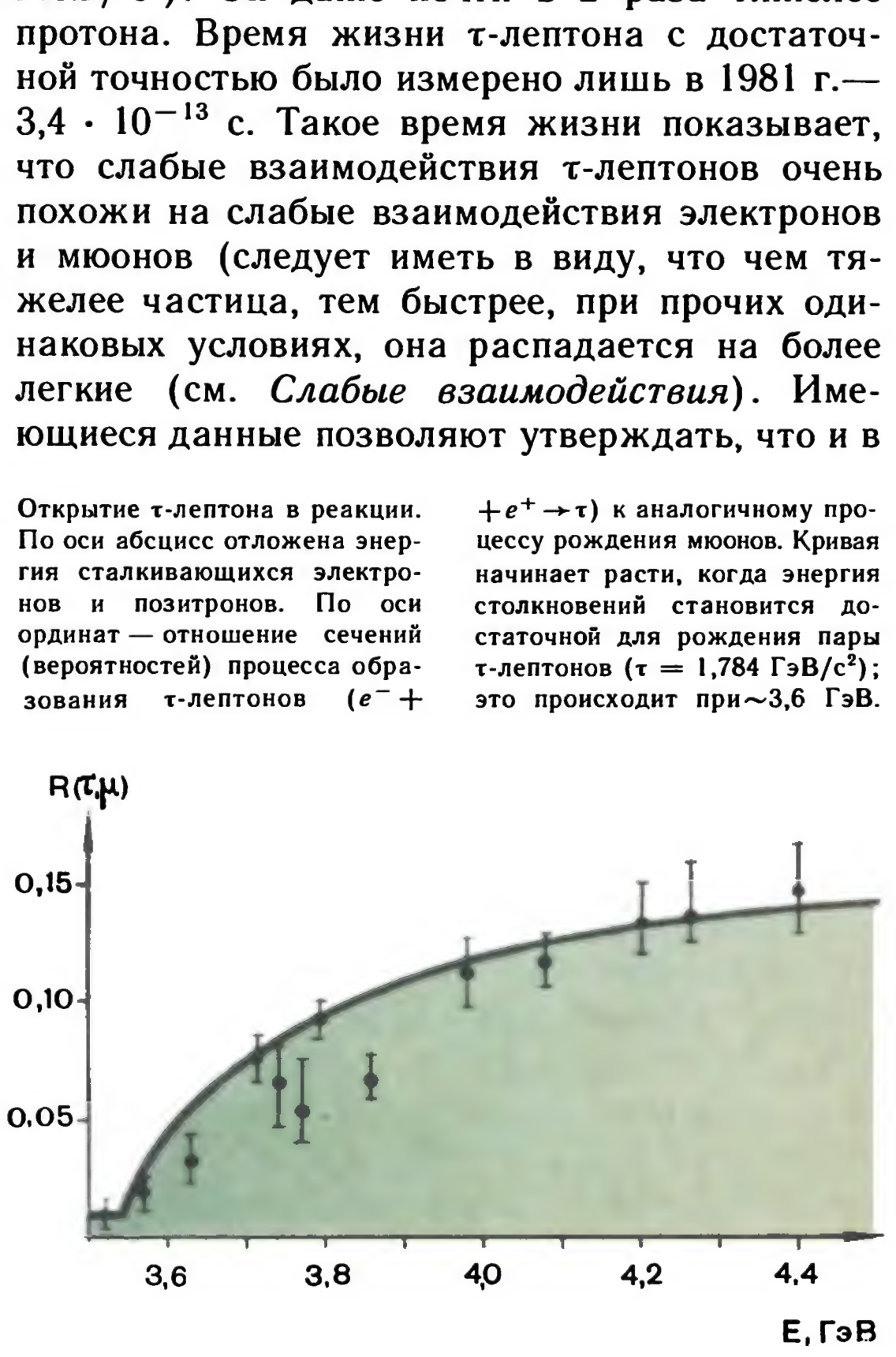
Лептоны — группа частиц, не участвующих в *сильном взаимодействии* (название происходит от греческого слова «лептос» — «легкий»). Все лептоны имеют *спин* 1/2. Различают заряженные лептоны — электрон e^-, мюон μ^-, тяжелый лептон τ^- и соответствующие им античастицы e^+, μ^+ и τ^+ (см. *Антивещество*) и нейтральные — различного вида *нейтрино,* о которых рассказано в отдельной статье.

Первым из заряженных лептонов был открыт *электрон* — в 1897 г. английским ученым Дж. Дж. Томсоном (см. *Электрон*). Его античастица — позитрон — была найдена в 1932 г. в космических лучах американским физиком К. Андерсоном. В 1936 г. также при изучении космических лучей были обнаружены мюоны μ^- и μ^+ (К. Андерсон и С. Неддермейер). Сначала произошла маленькая путаница: мюоны попытались отождествить с частицей, которая, согласно теории японского физика Х. Юкавы, переносила сильные взаимодействия. Вскоре, впрочем, выяснилось, что к сильным взаимодействиям мюон отношения не имеет (частицами, предсказанными Юкавой, оказались открытые в 1947 г. π-мезоны). И тогда возникла загадка мюона. Дело в том, что мюон удивительно похож на электрон: у них одинаковый электрический заряд, спин, оба они участвуют лишь в *слабых* и электромагнитных *взаимодействиях,* причем аналогичным образом. Единственное видимое их отличие заключается в *массе*: мюон в 206,8 раза тяжелее электрона (современное значение его массы $m_\mu = 105{,}659\,43$ МэВ/$c^2 \simeq 1{,}88 \cdot 10^{-25}$ г). Из-за большей величины массы мюон утерял стабильность, время его жизни $\simeq 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с.

Электрон стабилен, так как ему просто не на что распадаться. Действительно, из-за сохранения электрического заряда распад электрона был бы возможен только с испусканием более легких заряженных частиц, но о существовании таких частиц до сих пор ничего не известно. Если бы закон сохранения заряда не являлся вполне точным законом природы, то электрон мог бы распасться, например, на *нейтрино* и *фотон.* Поиски таких распадов, однако, не увенчались успехом и показали, что время жизни электрона, по крайней мере, больше чем 10^{22} лет (для сравнения: наша Вселенная существует «всего» около $2 \cdot 10^{10}$ лет). Поэтому в современных теориях электрон считается стабильной частицей. Заметим все же, что экспериментальные пределы для времени жизни *протона* выглядят еще внушительнее (не менее 10^{32} лет), но теории, в которых он может распадаться, в последнее время стали очень популярны (см. *Единство сил природы*).

С распадом мюона дело обстоит проще, он может распадаться и в действительности распадается на *электрон* и пару *нейтрино* разных сортов: $\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$. За этот распад ответственны *слабые взаимодействия.* Экспериментальное значение времени жизни мюона хорошо согласуется с теоретическими расчетами. Разумеется, аналогичным образом происходит и распад положительно заряженного мюона: $\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu$.

Не успев еще разобраться в загадке мюона, физики открыли третий заряженный лептон τ (тау-лептон). Он был обнаружен в 1975 г. в опытах на встречных электрон-позитронных пучках в Станфорде (США) группой физиков во главе с М. Перлом при аннигиляции электрона и позитрона очень больших энергий. Тяжелый тау-лептон имеет массу почти в 3500 раз бóльшую, чем масса электрона ($m_\tau \simeq 1784$ МэВ/c^2). Он даже почти в 2 раза тяжелее протона. Время жизни τ-лептона с достаточной точностью было измерено лишь в 1981 г.— $3{,}4 \cdot 10^{-13}$ с. Такое время жизни показывает, что слабые взаимодействия τ-лептонов очень похожи на слабые взаимодействия электронов и мюонов (следует иметь в виду, что чем тяжелее частица, тем быстрее, при прочих одинаковых условиях, она распадается на более легкие (см. *Слабые взаимодействия*). Имеющиеся данные позволяют утверждать, что и в



Открытие τ-лептона в реакции. По оси абсцисс отложена энергия сталкивающихся электронов и позитронов. По оси ординат — отношение сечений (вероятностей) процесса образования τ-лептонов ($e^- + e^+ \to \tau$) к аналогичному процессу рождения мюонов. Кривая начинает расти, когда энергия столкновений становится достаточной для рождения пары τ-лептонов ($\tau = 1{,}784$ ГэВ/c^2); это происходит при ~3,6 ГэВ.

остальном τ-лептон подобен электрону и мюону (так называемая e — μ — τ-универсальность).

Заряженные лептоны объединены еще одним свойством: в современных теориях все они представляются точечными объектами, не имеющими, в отличие от адронов, внутренней структуры. Эксперименты на самых мощных ускорителях при максимально достижимых в настоящее время энергиях показывают, что это справедливо, по крайней мере, вплоть до расстояний $\simeq 10^{-16}$ см.

Наблюдая за реакциями с участием лептонов, ученые обнаружили, что всегда остается постоянной разность числа лептонов и антилептонов. Для описания этого свойства ввели особое квантовое число — лептонный заряд L, условно приписав значение $L = 1$ отрицательно заряженным лептонам и сопутствующим им нейтрино, а значение $L = -1$ — их античастицам. Тогда указанное явление сводится к закону сохранения лептонного заряда. Например, в реакции *бета-распада нейтрона* $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$ вместе с электроном ($L = 1$) должно родиться электронное антинейтрино ($L = -1$). Позднее установили, что электронное и мюонное нейтрино не тождественны друг другу, и пришлось ввести различные, сохраняющиеся независимо лептонные заряды L_e и L_μ. По-видимому, существует и третий тип лептонного заряда, связанный с тяжелым лептоном и его нейтрино.

Пока не наблюдалось случаев нарушения закона сохранения лептонного заряда. Скажем, этот закон запрещает безнейтринные распады мюона вроде $\mu^- \to e^- + \gamma$ и т. п. Отношение вероятностей запрещенного и обычного распадов мюона оценивалось в экспериментах и оказалось меньшим 10^{-9}—10^{-10}. Поиск запрещенных распадов представляет большой интерес, так как не исключена возможность обнаружения несохранения лептонного заряда. Следует подчеркнуть, что лептонный заряд не является источником какого-то «лептонного» поля, а введен исключительно для объяснения наблюдаемых на опыте закономерностей реакций с участием лептонов.

Появившиеся в последнее время теории, основанные на представлениях о *единстве сил природы*, предсказывают неустойчивость *протона* и одновременно нарушение сохранения лептонного заряда (например, в процессе $p \to e^+ - \pi^0$).

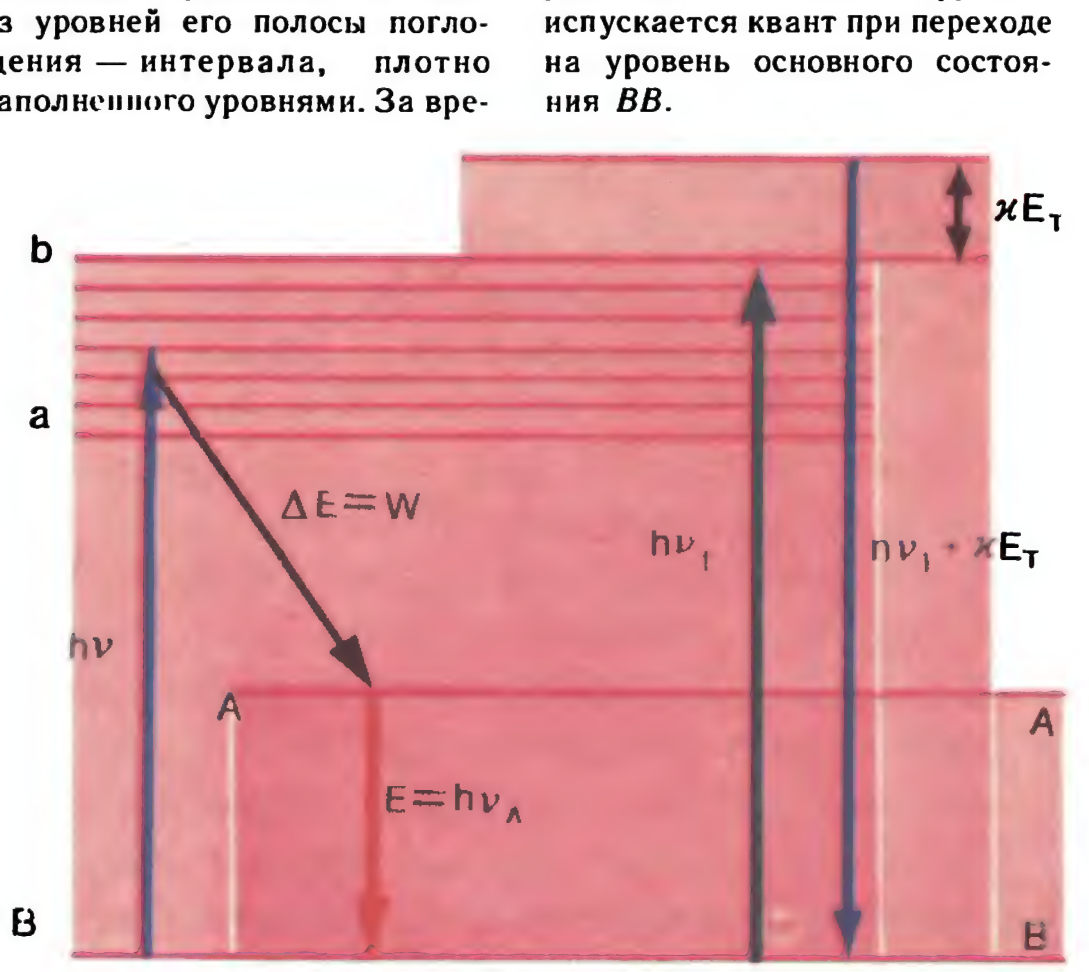
В чем же заключается причина существования разных типов лептонов с близкими свойствами и сильно различающимися массами? Какова природа лептонных зарядов? И нет ли еще других, пока что неизвестных нам лептонов? Сейчас на эти вопросы еще нет ответа. Решение их связано не только с лептонами, но и с другими истинно элементарными частицами — *кварками*, представляющими собой основные структурные элементы мира сильновзаимодействующих частиц (см. *Кварки, Адроны*). Кварки тоже сильно различаются по массам и обладают своими специфическими «зарядами». Пары кварков объединяются вместе с парами лептонов (заряженным лептоном и соответствующим нейтрино) в так называемые поколения *элементарных частиц*. Многие свойства частиц повторяются из поколения в поколение, а массы поколений сильно различаются между собой: второе поколение (в него входят мюоны) тяжелее первого (с электронами), а третье поколение (включающее τ-лептоны) тяжелее второго. Исследования многих загадок этих поколений еще только начинаются.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

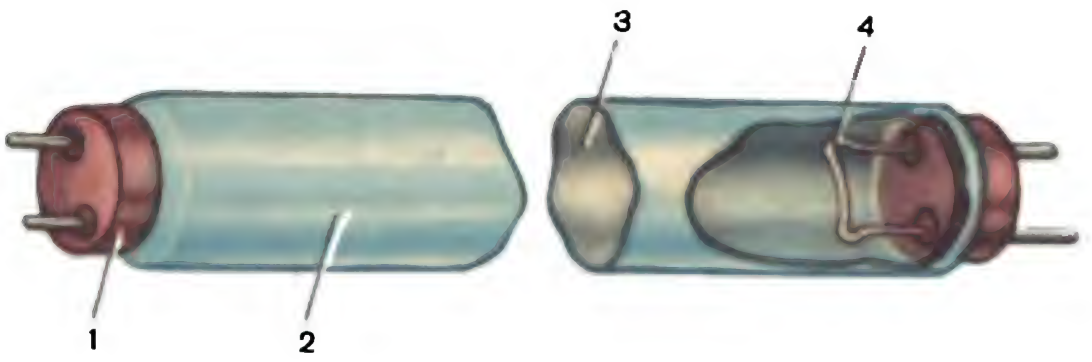
Еще с доисторических времен людям было известно свечение некоторых насекомых, гнилого дерева, минералов. Оно казалось загадочным. Только современная наука раскрыла природу такого свечения. Заключена она в явлении, называемом *люминесценцией*. Люминесцентное излучение исходит из сравнительно небольшого числа центров люминесценции — *атомов, молекул* или ионов, приходящих в возбужденное состояние под действием внешних причин, а затем, при переходе возбужденного центра на более низкий энергетический уровень, испускающих квант люминесцентного излучения (см. рис.). Вещества, в которых происходит люминесценция, называют люминофорами.

Время, затрачиваемое в среднем на переход центра люминесценции из возбужденного состояния на более низкий энергетический уровень,— одна из главных характеристик лю-

Механизм возбуждения люминесценции. Фотон источника света переводит центр люминесценции кристалла на один из уровней его полосы поглощения — интервала, плотно заполненного уровнями. За время 10^{-8} с центр люминесценции переходит на уровень AA, отдав энергию кристаллической решетке. С этого уровня испускается квант при переходе на уровень основного состояния BB.



Люминесцентная лампа. *1* — цоколь; *2* — стеклянная трубка; *3* — тонкий слой люминофора; *4* — накаливаемая спираль, термиссионные электроны которой облегчают установление в лампе дугового разряда.



минесцентного процесса. Если люминесцентное излучение после отключения его возбудителя прекращается быстро, примерно за одну стомиллионную долю секунды (10^{-8} с), то такой вид люминесценции называют флуоресценцией. 10^{-8} с — характерное время жизни возбужденного атома. Обычно в среднем такое время атом находится в возбужденном состоянии до перехода в основное, если возбуждены уровни внешней электронной оболочки.

Другой вид люминесценции — фосфоресценция — характеризуется медленным спадом свечения после отключения источника энергии возбуждения. В этом случае центры люминесценции после возбуждения находятся в метастабильных состояниях, из которых переход в состояния с меньшей энергией «запрещен» и совершается за гораздо более длительное время, чем 10^{-8} с.

Виды люминесценции различают и по способу ее возбуждения. Так, экран телевизора светится под падающим на него электронным пучком благодаря свечению люминофора, нанесенного на стенку экрана кинескопа. В этом случае центры люминесценции возбуждаются электронным пучком. В начале века электронные пучки называли катодными лучами. Поэтому такой вид люминесценции получил название катодолюминесценции.

Люминесцентные лампы значительно экономичнее ламп накаливания: на каждый ватт мощности они дают световой поток, в несколько раз превышающий световой поток лампы накаливания. Их КПД достигает 20%. В цилиндрическом баллоне такой лампы идет электрический разряд в парах ртути. Возбужденные атомы ртути испускают мощные потоки

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ВАВИЛОВ (1891 — 1951)

Советский ученый Сергей Иванович Вавилов родился в Москве. В 1914 г. окончил с отличием физико-математический факультет Московского университета. Направление его научных интересов складывалось под влиянием известного русского физика П. Н. Лебедева. Первая самостоятельная научная работа Вавилова, выполненная в студенческие годы, была опубликована в 1914 г. Она посвящена химическому действию света на цианновые красители (выцветанию красок под действием света) и удостоена золотой медали Общества любителей естествознания при Московском университете. И в дальнейшем всю жизнь Вавилов занимался исследованием различных сторон природы света.

Особенно крупный вклад С. И. Вавилов внес в изучение *люминесценции* — длительного свечения некоторых веществ, предварительно освещенных светом. Он открыл основные закономерности этого давно известного, но почти не изученного явления и глубоко проник в механизм взаимодействия света с веществом. Стремясь к практическому использованию люминесценции, он заложил основы люминесцентного анализа химического состава различных веществ и разработал отечественную технологию производства люминесцентных ламп дневного и белого света, широко используемых в светотехнике.

Вавилов осуществил тончайшие эксперименты по обнаружению квантовых *флуктуаций* света, дав наиболее наглядное доказательство квантовой природы света. Вместе с советским ученым П. А. Черенковым С. И. Вавилов обнаружил новое физическое явление, позднее названное *Вавилова — Черенкова эффектом*.

Он был также крупным специалистом в истории физики и, в частности, перевел на русский язык все труды Ньютона по оптике и написал одну из лучших биографий этого великого ученого.

В 1934 г. С. И. Вавилов возглавил Физический институт Академии наук СССР, которому по его инициативе было присвоено имя П. Н. Лебедева. С 1932 по 1945 г. он являлся научным руководителем Государственного оптического института.

Вавилов создал обширную научную школу советских физиков-оптиков. В 1932 г. он был избран академиком, в 1945 г.— президентом Академии наук СССР.

С. И. Вавилов — блестящий популяризатор физики. Его научно-популярные книги «Глаз и Солнце», «О «теплом» и «холодном» свете» проникнуты любовью к науке.

электромагнитного излучения, основная энергия которого лежит в ультрафиолетовой части спектра. Стенки лампы покрыты люминофорами, светящимися под действием ультрафиолетового излучения разным цветом. Поглощая ультрафиолетовое излучение, смесь люминофоров излучает в видимой области спектра и в достаточной мере воспроизводит спектр дневного света. Такой вид люминесценции, возбуждаемой электромагнитным излучением, называют ф о т о л ю м и н е с ц е н ц и е й.

Еще в 1852 г. английский физик Дж. Стокс установил правило: длина волны света, испускаемого люминофором, больше, чем длина волны возбуждающего света. Подмеченная Стоксом закономерность находит простое объяснение на основе представлений *квантовой механики*. Поглощая фотон с энергией $h\nu$, центр люминесценции не может подняться на энергетический уровень $E > h\nu$ (см. рис.). Энергия люминесцентного кванта $h\nu_л$ всегда меньше $h\nu$. Энергия $h\nu_л$ испускается при переходе на промежуточный уровень $E_п$. Часть энергии кванта W может затрачиваться и на другие процессы. И все же нет правил без исключений — в некоторых случаях наблюдают а н т и с т о к с о в о и з л у ч е н и е, когда $h\nu_л > h\nu$. В этом случае к энергии фотона $h\nu$ добавляется часть энергии теплового движения частиц люминесцирующего вещества $E_т$: $h\nu_л = h\nu + E_т$.

Энергия химических реакций — другой источник возбуждения люминесценции. В организме светлячка химическая энергия переходит в световую с очень большим КПД, приближающимся к 100%. Это в 5 раз больше, чем у люминесцентных ламп. Такой вид люминесценции называют х е м и л ю м и н е с ц е н ц и е й.

Люминесценция используется не только в газоразрядных лампах и кинескопах. Люминесцентное свечение наблюдают при очень малых концентрациях вещества. На этом основан л ю м и н е с ц е н т н ы й а н а л и з. Исследуя люминесценцию кусочков породы из буровой скважины, нефтяники узнают о близости нефтеносных слоев и даже определяют количество нефти. Методом люминесцентного анализа отличают различные сорта стекол, изучают биологические объекты.

«СВЕТЯЩИЙСЯ» СОСТАВ

Фосфоресценцией, т. е. способностью светиться заметное время после того, как внешний источник света удалили, обладают также многие вещества — люминофоры. Интересный способ приготовления борного люминофора в домашних условиях описан В. В. Майером («Квант», 1973, № 3). Приведем это описание.

1 г хвойного концентрата разводят в 50 мл воды. Затем берут 2—3 г борной кислоты, помещают на алюминиевую пластинку и капают на нее раствор концентрата — 10, 20 или 30 капель (в зависимости от количества капель яркость свечения и его цвет будут несколько различаться). Перемешивают концентрат с кислотой до образования однородной массы, разравнивают ее в виде лепешки толщиной 2—3 мм и подогревают на пластинке. Нагревание идет до тех пор, пока вся масса не расплавится. Остывшее вещество представляет собой борный люминофор. Как видно из описания, все исходные вещества можно приобрести в аптеке.

Полученный люминофор способен довольно ярко светиться в темноте после того, как его «зарядят» у электрической лампочки.

Свечение продолжается несколько секунд.

Используя различные светофильтры, можно наблюдать выполнение для люминофора закона Стокса. Так, красный, желтый и зеленый светофильтры почти полностью гасят фосфоресценцию. Синий и фиолетовый — не гасят.

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ РАСТВОРОВ

В лабораторной практике и для демонстраций на лекциях применяют самые различные растворы, обладающие яркой флуоресценцией. Наиболее известны такие, как водно-щелочной раствор флуоресцина, раствор родамина и т. п. Выбор же веществ для домашних опытов невелик. Слабую голубую флуоресценцию обнаруживает чистый керосин, желто-зеленую — риваноль (его можно купить в аптеке). Иногда флуоресцируют много раз использованные проявители для фотопленок или фотобумаги.

Наблюдать флуоресценцию раствора лучше всего с помощью диапроектора, в который вместо диапозитива вставлен кусок картона с вырезанным в центре отверстием ($d = 2 \div 3$ мм). Это позволяет получить слаборасходящийся луч света. Растворы помещают в стеклянный сосуд (лучше, если он прямоугольной формы, например флакон из-под духов) и фокусируют изображение отверстия на передней стенке сосуда. Если в сосуд налита обычная прозрачная жидкость, то, наблюдая сбоку, нельзя в ней увидеть луч света. Во флуоресцирующей жидкости луч хорошо виден из-за того, что падающий свет переизлучается ее молекулами во все стороны.

МАГНЕТИЗМ

История открытия магнитных свойств веществ уходит в глубь веков. Так, еще более двух тысяч лет назад магнитные материалы использовались в качестве компаса.

В современной физике магнетизм — обширный раздел, связанный с большинством ведущих областей физической науки и изучающий взаимодействие вещества с магнитным полем.

Важнейшую роль в развитии учения о магнетизме сыграла гипотеза Ампера, согласно которой магнитные свойства вещества обусловлены элементарными замкнутыми токами, циркулирующими внутри небольших частиц вещества — *атомов*, *молекул* или их групп. При описании магнитного поля в веществе — магнетике можно, не вдаваясь в природу этих элементарных токов, для простоты считать их всех одинаковыми. Тогда каждая молекула вещества характеризуется *магнитным моментом* $\lambda = i\Delta S$, где i — элементарный молекулярный ток, а ΔS — площадь его контура. Если магнетик не намагничен, то молекулярные токи ориентированы хаотически, и их суммарное магнитное поле равно нулю. Под действием магнитного поля $\vec{B}_0$, создаваемого внешними токами, происходят различные процессы намагничивания вещества, и при этом возникает дополнительное усредненное поле молекулярных токов $\vec{B}_1$, так что суммарное поле, действующее в магнетике, характеризуется магнитной индукцией $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$.

Величина поля может быть выражена через намагниченность магнетика I, т. е. через магнитный момент, приходящийся на единицу объема вещества. Для установления этой связи рассмотрим бесконечный цилиндрический стержень из магнетика, помещенный во внешнее поле $\vec{B}_0$, направленное параллельно оси цилиндра (рис. 1). Намагниченный цилиндр можно представить схематично как совокупность ориентированных по полю $\vec{B}_0$ молекулярных токов (магнитных моментов λ). Произвольный цилиндрический слой толщиной Δl характеризуется магнитным моментом, величина которого $I \cdot \Delta l \cdot \pi R^2 = n\lambda\pi R^2\Delta l$. Здесь n — эффективное число ориентированных по полю элементарных молекулярных токов (на единицу объема вещества). Величина n зависит от $\vec{B}_0$, температуры и свойств вещества.

Как видно из рис. 1, совокупность молекулярных токов эквивалентна некоторому эффективному поверхностному току с линейной плотностью j, текущему по цилиндрической поверхности. При этом величина j может быть связана с намагниченностью I требованием равенства суммарного магнитного момента намагниченного вещества и магнитного момента как бы заменяющего его эффективного тока: $I \cdot \Delta V = I(\Delta l\pi R^2) = (j\Delta l)\pi R^2$, т. е. $j = I$. Магнитное поле суммы ориентированных молекулярных магнитных моментов тогда должно быть равно полю в бесконечном соленоиде с плотностью тока на единицу длины $j = I$, т. е. $\vec{B}_1 = \mu_0 j$, или $\vec{B}_1 = \mu_0\vec{I}$ ($\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}\text{Н} \cdot \text{с}^2\text{Кл}^{-2}$ — постоянная в системе СИ).

Намагниченность зависит от магнитного поля $\vec{B}_0 : \vec{I} = \varkappa \cdot \vec{B}_0/\mu_0$, где безразмерная величина $\varkappa$ получила название магнитной восприимчивости вещества. Величина $\vec{B}_0/\mu_0$ называется напряженностью магнитного поля токов и обозначается $\vec{H}_0$. Напряженность магнитного поля обусловлена только внешними токами, и поэтому в однородном и изотропном магнетике (о котором здесь идет речь), заполняющем весь объем поля (или ограниченном силовыми линиями внешнего поля), $\vec{H} = \vec{H}_0$, т. е. не зависит от намагниченности вещества.

Любой однородный магнетик сводится к совокупности рассмотренных выше бесконечных цилиндров. Отсюда следует, что магнитная индукция в однородном магнетике $\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0\vec{I} = (1 + \varkappa)\vec{B}_0 = \mu\vec{B}_0$. Величина $\mu = 1 + \varkappa$ называется магнитной проницаемостью вещества. Измерения показали, что для большинства веществ магнитная проницаемость близка к единице и не зависит от величины магнитного поля.

Все такие вещества могут быть разбиты на два класса:

1) $\mu > 1$ — парамагнетики, в которых намагниченность вещества увеличивает сум-

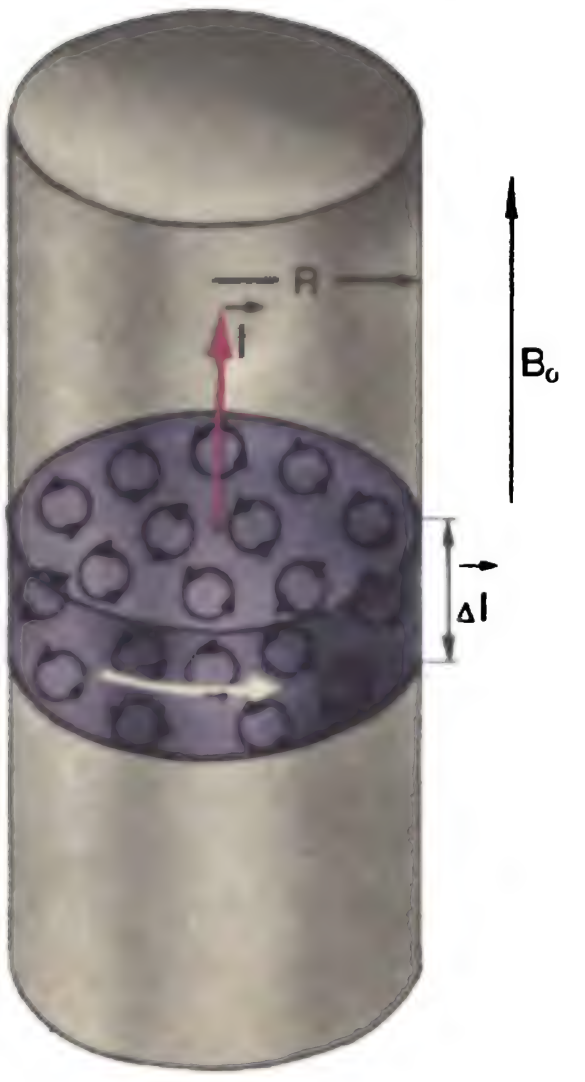


Рис. 1. Цилиндрический стержень из магнетика, помещенный во внешнее поле B_0, направленное параллельно оси цилиндра.

Рис. 2а. Жидкий парамагнетик в сильном неоднородном магнитном поле (магнитный момент, ориентированный по полю, втягивается в область сильного поля).

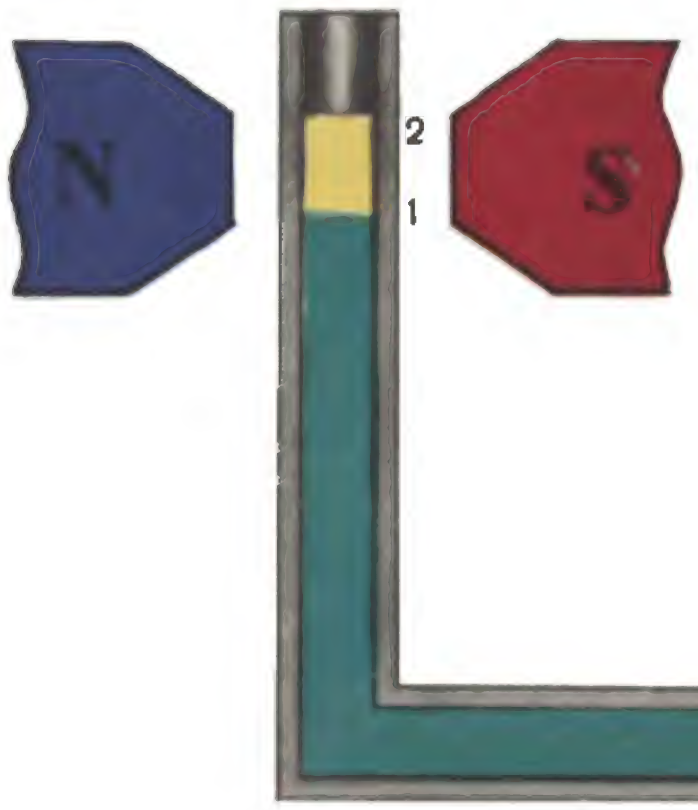
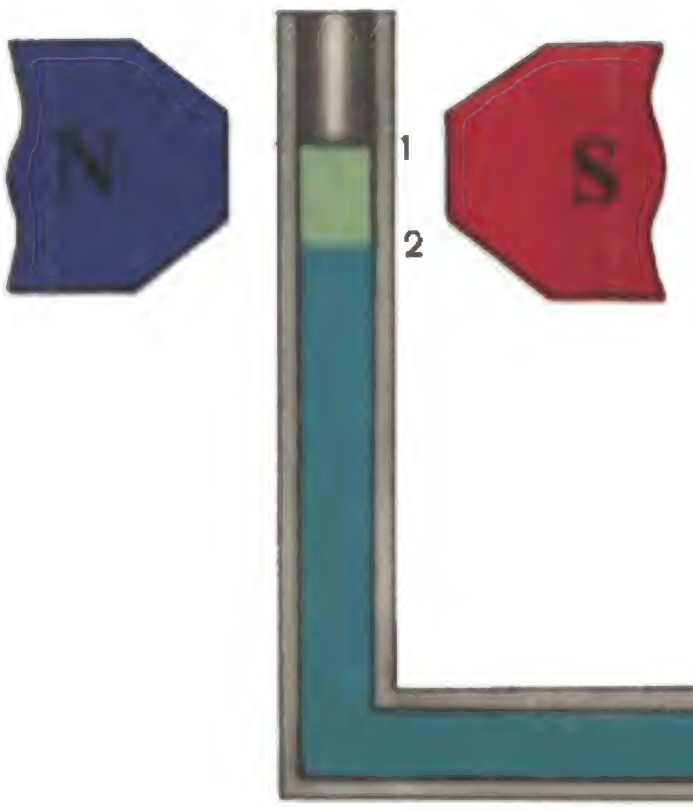


Рис. 2б. Жидкий диамагнетик в сильном неоднородном магнитном поле (магнитный момент, ориентированный против поля, выталкивается из области сильного поля).



марное поле $\vec{B}$; парамагнетики втягиваются в область сильного неоднородного магнитного поля (рис. 2а);

2) $\mu < 1$ — диамагнетики, в которых намагниченность вещества уменьшает суммарное поле; диамагнетики выталкиваются из области сильного неоднородного поля (рис. 2б).

Разделение веществ на парамагнетики и диамагнетики впервые было установлено английским физиком М. Фарадеем в 1845 г. с помощью опытов, близких к тем, которые изображены на рис. 2. Кроме того, имеется класс веществ, в которых величина магнитной проницаемости (и магнитной восприимчивости) может быть очень большой и сильно зависит от магнитного поля, а также от температуры вещества; это так называемые магнитоупорядоченные состояния — ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики.

Рассмотрим теперь магнитные явления в веществе с точки зрения современной теории строения *материи*.

Как известно, *атом* вещества состоит из ядра и электронной оболочки. Если электронную орбиту с движущимся по ней электроном представить как контур с током, то легко понять, что каждая орбита имеет свой *магнитный момент*. К тому же благодаря собственному моменту вращения — *спину* — магнитным моментом обладает и сам *электрон*.

Спином и магнитным моментом обладают и ядерные частицы — *протон* и *нейтрон*. Но так как масса протона в 1836 раз больше массы электрона, то при том же спине его магнитный момент много меньше, чем у электрона. Интересно, что электрически нейтральный нейтрон имеет магнитный момент, сравнимый по величине с магнитным моментом протона. Магнитными моментами обладают и многие другие *элементарные частицы*.

Имея общее представление об элементарных носителях магнитного момента, проследим реакцию вещества на наложение магнитного поля и объясним три наблюдаемых типа магнитных эффектов: диамагнетизм, парамагнетизм и магнитоупорядоченное состояние.

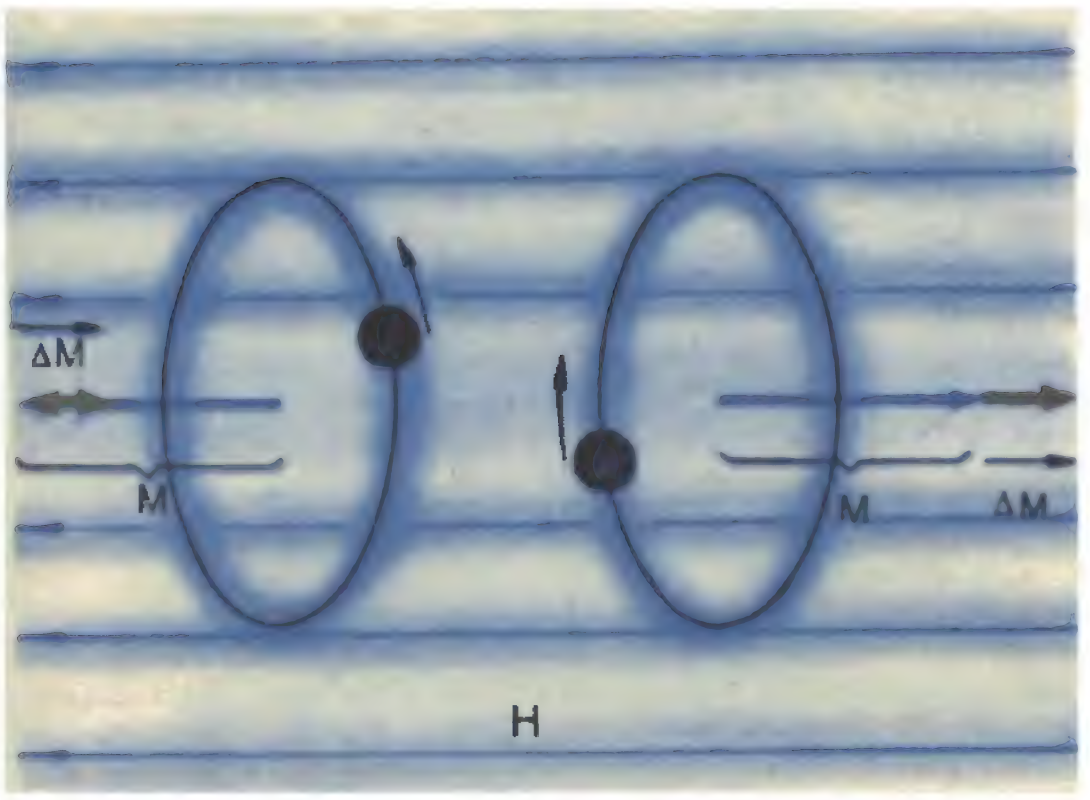
Если рассматривать электронную орбиту как контур с током, то при наложении магнитного поля в соответствии с правилом Ленца в контуре должна индуцироваться электродвижущая сила (ЭДС). Возникающее при этом магнитное поле направлено против внешнего поля (рис. 3). Следовательно, внутри материала магнитное поле будет уменьшаться. Его относительное уменьшение $\Delta B / B = \varkappa_д$ — диамагнитная восприимчивость — величина порядка 10^{-8}. Диамагнетизмом обладают все вещества, и его величина не зависит от температуры.

В общем случае атом вещества может иметь собственный результирующий магнитный момент, например при нечетном числе электронов у атома. В отсутствие магнитного поля магнитный момент тела равен нулю вследствие беспорядочного распределения по направлениям атомных магнитных моментов. Действие магнитного поля, как уже говорилось ранее, будет сводиться к ориентации магнитных моментов в направлении наложенного поля, и внутри материала поле будет увеличиваться. Возникает парамагнитный эффект.

Парамагнетизм и диамагнетизм — сравнительно слабые эффекты, и вещества, в которых они проявляются, называют слабыми магнетиками. Исключение составляют вещества в сверхпроводящем состоянии (см. *Сверхпроводимость*). В этом случае при наложении магнитного поля индуцируются циркуляции токов, магнитные моменты которых направлены против внешнего поля и полностью его компенсируют. Диамагнитный эффект здесь очень большой, поэтому сверхпроводники называют идеальными диамагнетиками, для которых $\varkappa = -1$ и $\mu = 0$.

Магнитоупорядоченные состояния (ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм) имеют квантово-

Рис. 3. Схема образования диамагнитного момента.



механическую природу. Среди *твердых тел* есть такие, которые самопроизвольно (спонтанно), под действием внутренних сил намагничены. В них независимо от внешнего поля магнитные моменты спинов электронов выстроены параллельно (ферромагнетики) или антипараллельно (антиферромагнетики) (рис. 4, б, в). Наличие внутри ферромагнитного материала магнитного поля не всегда ощутимо внешне. Дело в том, что вещество разделено на малые области (домены), внутри которых оно спонтанно намагничено. Эти области ориентированы по отношению друг к другу под различными углами, и результирующий магнитный момент может быть равен нулю. При наложении даже относительно малых магнитных полей границы между доменами смещаются так, что увеличиваются те домены, магнитный момент которых направлен вдоль поля. В результате весь объем материала легко намагничивается, достигая магнитного насыщения (I_s), когда все магнитные моменты выстроены вдоль поля (рис. 5). Из химических элементов железо имеет максимальное магнитное насыщение при комнатной температуре.

ПОЛЬ ЛАНЖЕВЕН
(1872 — 1946)

Французский физик и общественный деятель. Родился в Париже, в рабочей семье участника Парижской коммуны. В 1891 г. окончил Школу физики и химии, а в 1897 г.— Нормальную школу в Париже. Затем в течение года Ланжевен работал в Англии, в Кембриджском университете, у известного английского физика Дж. Томсона. По возвращении во Францию начал заниматься преподавательской деятельностью в Парижском университете, Коллеж де Франс, Школе физики и химии. В 1925 г. он стал директором этой школы.

Научная деятельность Ланжевена развивалась в различных направлениях. Он исследовал процесс *ионизации* газов под действием *рентгеновских лучей*. Открыл существование тяжелых положительно заряженных ионов, масса которых в 1000 раз больше, чем обычных ионов. Впоследствии выяснилось, что именно такие ионы создают облака на больших высотах.

Мировую известность принесли Ланжевену исследования в области магнитных явлений. Продолжая работы известного французского физика П. Кюри, он дал объяснение основных магнитных явлений на основе электронной теории *металлов*. В 1905 г. Ланжевен разработал термодинамическую и статистическую теорию диамагнетизма и парамагнетизма (см. *Магнетизм*). Доказал универсальный характер диамагнетизма — диамагнитный эффект присутствует также в парамагнетиках и даже в ферромагнетиках, но там он перекрывается другими, более сильными эффектами. Статистическая теория парамагнетизма стала образцом применения статистической механики к исследованию свойств вещества.

Важное практическое значение имеют работы Ланжевена в области ультразвука. Он использовал пьезоэлектрический эффект (изменение размеров кварцевых пластинок под действием переменного электрического поля, приложенного к их поверхностям) для создания мощных ультразвуковых волн. Это позволило осуществить подводную сигнализацию, измерение глубин и обнаружение подводных лодок в годы первой мировой войны.

Прогрессивное значение имела общественная деятельность Ланжевена. Он был одним из активных деятелей Лиги прав человека, созданной в 1898 г. Принимал участие в создании Кружка друзей новой России (1919), выступал за развитие культурных связей с Советской Россией. Всю жизнь он активно боролся за мир, против фашизма. В 1944 г. вступил во Французскую коммунистическую партию. Он был большим другом нашей страны, одним из организаторов общества дружбы «Франция — СССР» и его председателем.

Рис. 4. Схема распределения магнитных моментов в веществах: *а* — парамагнетик; *б* — ферромагнетик; *в* — антиферромагнетик; *г* — нескомпенсированный антиферромагнетик.

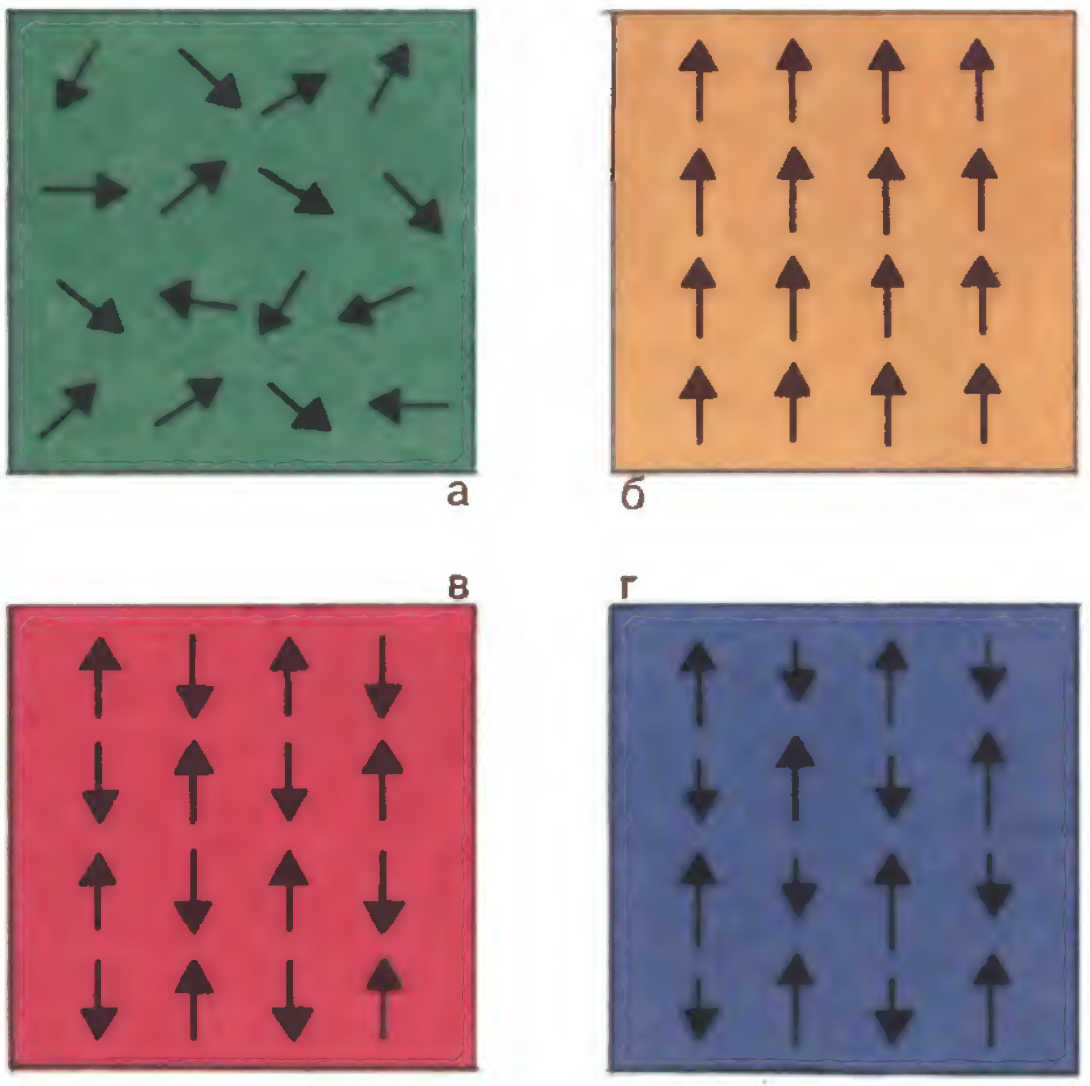
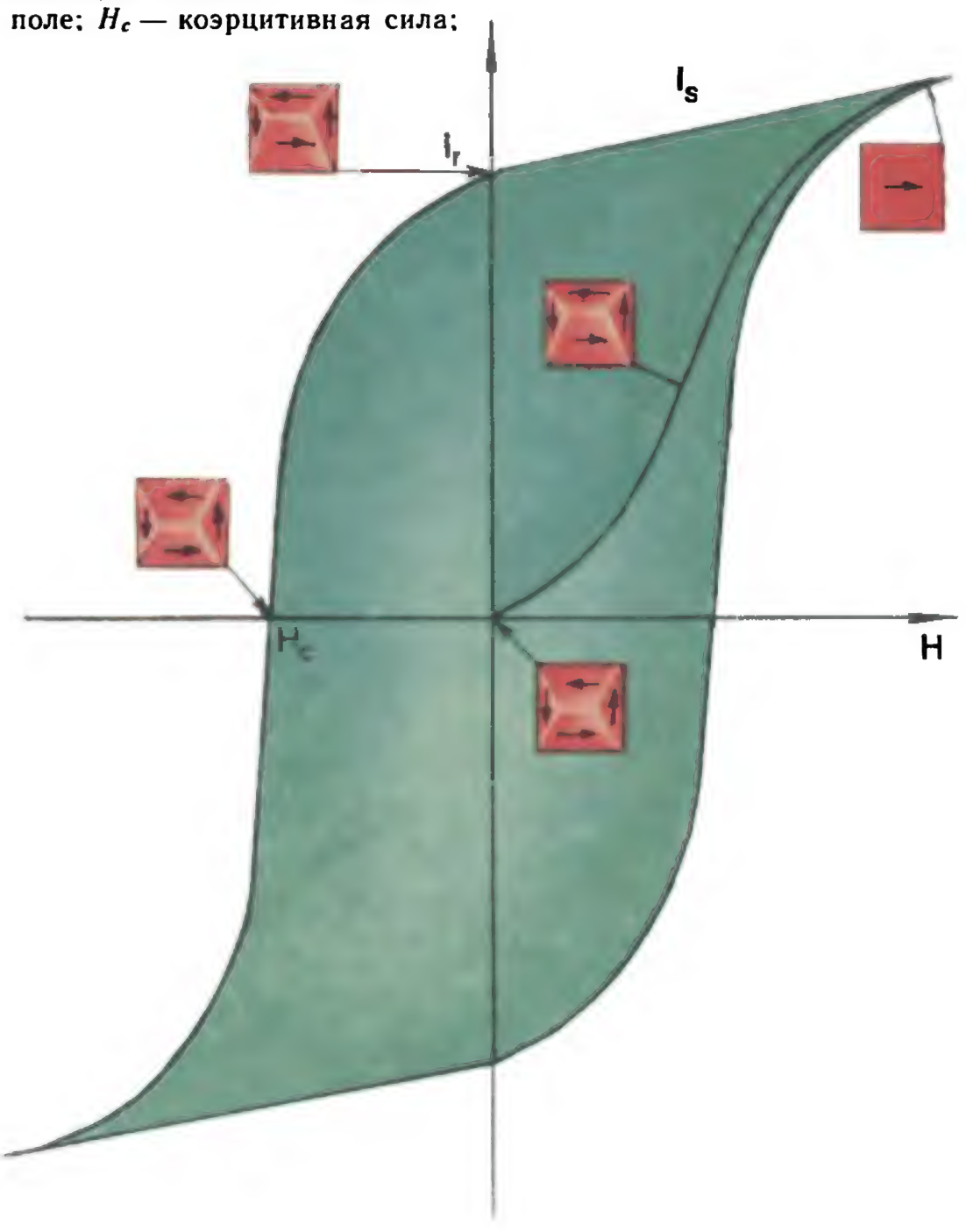


Рис. 5. Кривая намагничивания и петля гистерезиса ферромагнетика (I_r — магнитный момент единицы объема; H — внешнее поле; H_c — коэрцитивная сила; I_r — остаточная намагниченность, I_s — магнитное насыщение).



Ферромагнитный материал обладает как бы свойством запоминать свою магнитную историю. Если после намагничивания убрать магнитное поле, то результирующий магнитный момент не будет равен нулю. Это связано с тем, что не все домены займут прежнюю ориентацию, некоторые из них будут ориентированы близко к ранее наложенному полю. Оставшийся результирующий магнитный момент носит название остаточной намагниченности (I_r). Теперь сам ферромагнетик стал источником магнитного поля, интенсивность которого зависит от величины остаточной намагниченности.

Для достижения нулевого результирующего магнитного момента необходимо наложить магнитное поле противоположного направления. Это поле называется коэрцитивной силой (H_c). Увеличивая обратное поле, затем уменьшая его и накладывая вновь положительное поле, мы получим в координатах I — H петлю гистерезиса (рис. 5).

Какие же внутренние силы заставили векторы спиновых магнитных моментов выстроиться параллельно внутри каждого домена? Классическая физика не смогла дать на это ответ. Вероятностное определение местонахождения волны-частицы электрона, даваемое *квантовой механикой*, позволило понять, что заставляет магнитные моменты выстраиваться параллельно — это так называемое обменное взаимодействие. Пытаясь описать его классическим языком, можно сказать, что это электростатическая энергия взаимодействия двух электронов, когда первый электрон находится на месте второго, а второй — на месте первого. Вероятность такой ситуации в квантовой механике не равна нулю. При определенном расстоянии между взаимодействующими атомами обменное взаимодействие будет минимально, если магнитные моменты спинов параллельны (ферромагнетизм) или антипараллельны (антиферромагнетизм).

Таким образом, упорядоченное выстраивание магнитных моментов спинов электронов есть результат взаимодействия электронов. Встает вопрос: а какое направление выберут магнитные моменты спинов в кристаллической решетке? В данном случае необходимо учесть пространственное расположение орбиты электрона в кристаллической решетке. В силу вступает взаимодействие между магнитными моментами орбит и спинов, и там, где оно будет минимально, в этом направлении и выстроятся магнитные моменты. Возникает анизотропия (различие в направлениях) спонтанного намагничивания в кристаллической решетке. Для железа, например, таким направлением будет ребро куба элементарной ячейки.

Температура мешает упорядоченному расположению магнитных моментов. Увеличение амплитуды колебаний атомов приводит к разориентации магнитных моментов, и при определенной температуре — точке Кюри — правильный порядок нарушается, и ферромагнетик становится парамагнетиком.

Связь направления выстраивания магнитных моментов с кристаллической решеткой имеет еще одно интересное следствие. Параллельное или антипараллельное расположение магнитных моментов приводит к изменению объема и геометрии кристалла. Так, если кристалл был правильной сферой, то в результате магнитного

Рис. 6. Схема магнитострикции при охлаждении образца сферической формы от температуры выше точки Кюри θ_c;
а — при температуре выше θ_c;
б — при температуре ниже θ_c;
в — при наложении магнитного поля.

упорядочения он становится немножко больше в объеме и превращается в эллипсоид (рис. 6). Изменение формы ферромагнитных тел при их намагничивании называют магнитострикцией. Линейные изменения тела невелики (от десятитысячной до сотой доли процента), но этого достаточно, чтобы использовать явление магнитострикции в практике.

В некоторых антиферромагнетиках, например в оксиде железа, вследствие того, что антипараллельные магнитные моменты не равны между собой, возникает явление нескомпенсированного антиферромагнетизма, или ферримагнетизма. Здесь все происходит так же, как и в ферромагнетиках, только результирующий магнитный момент меньше. Такие вещества называются ферритами.

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

Известно, что магнитное поле оказывает ориентирующее действие на рамку с током, и рамка поворачивается вокруг своей оси. Происходит это потому, что в магнитном поле на рамку действует момент сил, равный:

$$M = I \cdot S \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \alpha.$$

Здесь $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля, I — ток в рамке, S — ее площадь и α — угол между силовыми линиями и перпендикуляром к плоскости рамки. В это выражение входит произведение $I \cdot S$, которое называют магнитным дипольным моментом или просто *магнитным моментом* рамки Оказывается, величина магнитного момента полностью характеризует взаимодействие рамки с магнитным полем. Две рамки, у одной из которых большой ток и малая площадь, а у другой — большая площадь и малый ток, будут вести себя в магнитном поле одинаково, если их магнитные моменты равны. Если рамка маленькая, то ее взаимодействие с магнитным полем не зависит от ее формы.

Удобно считать магнитный момент вектором, который расположен на линии, перпендикулярной плоскости рамки. Направление вектора (вверх или вниз вдоль этой линии) определяется «правилом буравчика»: буравчик нужно расположить перпендикулярно плоскости рамки и вращать по направлению тока рамки — направление движения буравчика укажет направление вектора магнитного момента.

Таким образом, магнитный момент — это вектор $I \cdot S$, перпендикулярный плоскости рамки.

Теперь наглядно представим поведение рамки в магнитном поле. Она будет стремиться развернуться так, чтобы ее магнитный момент был направлен вдоль вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$. Маленькую рамку с током можно использовать в качестве простейшего «измерительного прибора» для определения вектора индукции магнитного поля.

Магнитный момент — важное понятие в физике. В состав *атомов* входят ядра, вокруг которых вращаются электроны. Каждый движущийся вокруг ядра *электрон* как заряженная частица создает ток, образуя как бы микроскопическую рамку с током. Вычислим магнитный момент одного электрона, движущегося по круговой орбите радиуса r.

Электрический ток, т. е. величина заряда, которая переносится электроном на орбите за 1 с, равна заряду электрона e, помноженному на число совершаемых им оборотов $v/2\pi r$:

$$I = \frac{ev}{2\pi r}.$$

Следовательно, величина магнитного момента электрона равна:

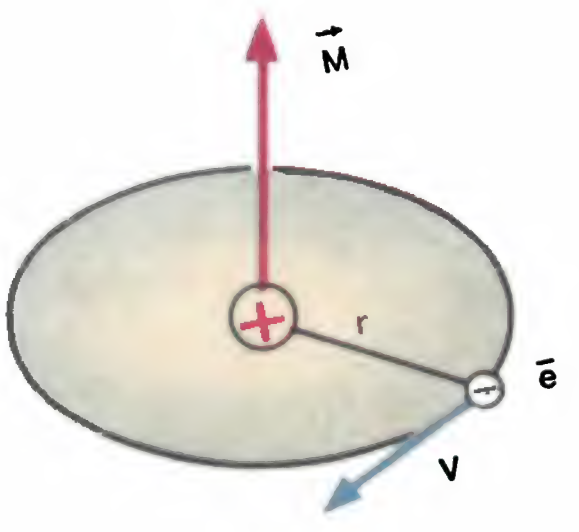
$$\mu = I \cdot S = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}.$$

μ можно выразить через величину момента импульса электрона $L = m \cdot v \cdot r$. Тогда величина магнитного момента электрона, связанная с его движением по орбите, или, как говорят, величина орбитального магнитного момента, равна:

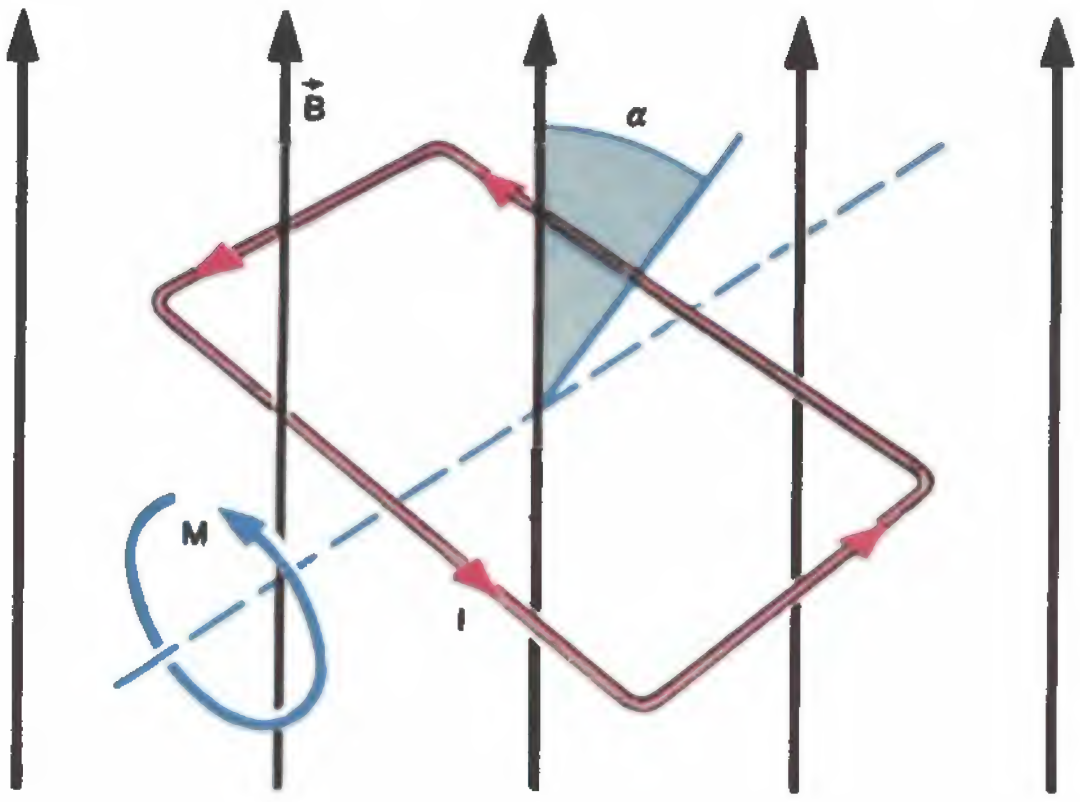
$$\mu = \frac{e}{2m} \cdot L.$$

Атом — это объект, который нельзя описать с помощью классической физики: для таких малых объектов действуют совершенно иные законы — законы *квантовой механики*. Тем не менее результат, полученный для орбитального магнитного момента электрона, оказывается

Магнитный момент электрона, движущегося по круговой орбите радиуса r со скоростью v



Рамка с током в магнитном поле поворачивается вокруг своей оси.



таким же, как и в квантовой механике. Иначе дело обстоит с собственным магнитным моментом электрона — *спином*, который связан с его вращением вокруг своей оси. Для спина электрона квантовая механика дает величину магнитного момента, в 2 раза бóльшую, чем классическая физика:

$$\mu = \frac{e}{m} \cdot L,$$

и это различие между орбитальным и спиновым магнитными моментами невозможно объяснить с классической точки зрения. Полный магнитный момент атома складывается из орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов, а поскольку они отличаются в 2 раза, то в выражении для магнитного момента атома появляется множитель $g\,(1 < g < 2)$, характеризующий состояние атома:

$$\mu = g\left(\frac{e}{2m}\right)L.$$

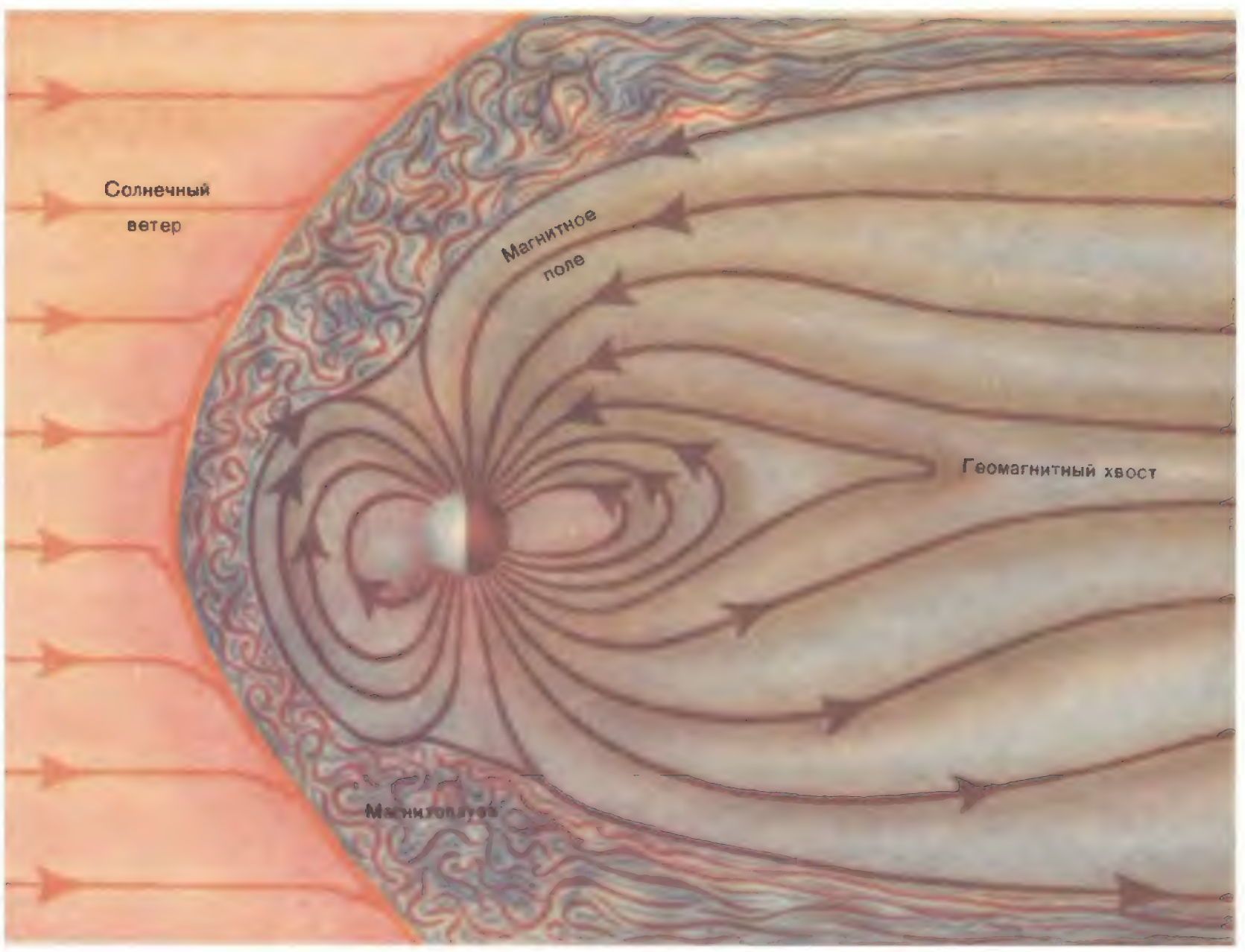
Таким образом, атом, как и обычная рамка с током, обладает магнитным моментом, и во многом их поведение сходно. В частности, как и в случае классической рамки, поведение атома в магнитном поле полностью определяется величиной его магнитного момента. В связи с этим понятие магнитного момента очень важно при объяснении различных физических явлений, происходящих с веществом в магнитном поле.

МАГНИТОСФЕРА

В статье словаря «Солнечный ветер» рассказывается о том, что заряженные частицы в магнитном поле движутся по-разному в зависимости от того, что больше — плотность магнитной энергии $H^2/8\pi$ или плотность кинетической энергии *плазмы* $\rho v^2/2$. Всем хорошо известно, что земной шар обладает собственным магнитным полем, убывающим при удалении от планеты. Поэтому, когда поток частиц, составляющих *солнечный ветер*, приближается к Земле, то на расстоянии около 10 земных радиусов он встречает уже достаточно сильное магнитное поле и должен изменить направления своих потоков.

На рисунке показано, к чему приводит столкновение солнечного ветра с земным магнитным полем. Траектории частиц солнечного ветра искривляются и начинают обтекать поверхность, которую называют границей магнитосферы. Земное магнитное поле тоже «чувствует» воздействие солнечного ветра, оно становится несимметричным, а в сторону удаления от Солнца вытягивается хвост из магнитных силовых линий, уходящих на бесконечность.

Траектории заряженных частиц солнечного ветра (желтые кривые) и силовые линии магнитного поля (коричневые). В магнитопаузе магнитное поле хаотично.



Между границей магнитосферы и регулярным магнитным полем Земли находится область, называемая магнитопаузой. В ней магнитное поле слабое, нерегулярно изменчивое и хаотически направленное.

Почти все планеты Солнечной системы имеют собственные магнитные поля и, следовательно, собственные магнитосферы. В несколько другом смысле существует и такое понятие, как магнитосфера Солнца. Вот что это означает. На расстоянии от Солнца порядка 100 радиусов орбиты Земли плотность кинетической энергии солнечного ветра из-за убывания плотности плазмы становится малой настолько, что с ней сравнивается плотность энергии слабых межзвездных магнитных полей (напряженность порядка 10^{-6} Гс). Поэтому должна существовать поверхность, окружающая всю Солнечную систему: внутри нее солнечный ветер увлекает магнитное поле Солнца (см. рис. на с. 154), а вне ее заряженные частицы движутся вдоль межзвездных магнитных полей. Расстояние до границы магнитосферы Солнца велико — до сих пор еще не проведено ее исследование космическими кораблями. Имеется, однако, косвенное экспериментальное свидетельство ее существования. Вот оно.

Вдоль силовых линий межзвездного магнитного поля летят заряженные частицы очень высоких энергий — *космические лучи*. Их энергия настолько велика, что они проникают и через границу солнечной магнитосферы. Тем не менее она служит им вполне заметным барьером. В те годы, когда солнечный ветер усиливается (годы активного Солнца), граница солнечной магнитосферы отодвигается дальше и становится большим препятствием для космических лучей. В результате этого с задержкой около года после возрастания солнечного ветра интенсивность космических лучей, измеряемых на Земле, падает. Время порядка года как раз уходит на то, чтобы солнечный ветер достиг границы магнитосферы Солнца. Космические же лучи распространяются практически со скоростью света — у них на тот же путь уходят всего сутки.

МАЗЕР

Мазерами называют квантовые генераторы и усилители *электромагнитных волн* сантиметрового диапазона. Термин «мазер» образован из начальных букв слов английской фразы, которая переводится следующим образом: «усиление микроволн (т. е. электромагнитных волн сантиметрового диапазона) в результате вынужденного излучения».

В мазерах незатухающие электромагнитные колебания поддерживаются за счет вынужденного излучения *атомов* и *молекул*. Частота этих колебаний задается резонансными частотами атомов и молекул, поэтому стабильность генерируемых колебаний оказывается чрезвычайно высокой, а влияние внешних факторов на стабильность незначительным. Высокая стабильность частоты генерации мазеров и привлекла к ним внимание физиков и инженеров.

Мазеры были предложены в 1955 г. одновременно и независимо Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР и Ч. Таунсом в США.

По виду активной среды, в которой происходят квантовое усиление и генерация электромагнитных волн, мазеры делятся на два типа. Мазеры, использующие молекулярные пучки, называются молекулярными генераторами, а второй тип мазеров, в котором применяются в качестве активной среды парамагнитные кристаллы, — парамагнитными генераторами и усилителями.

Для генерации электромагнитных волн в мазерах используется вынужденное испускание квантов электромагнитного излучения возбужденными атомами и молекулами вещества при их взаимодействии с внешним квантом электромагнитного излучения (см. *Лазер*).

В обычных условиях атомы и молекулы находятся в термодинамическом равновесии друг с другом и с окружающей средой; это означает, что число атомов или молекул в возбужденных состояниях тем меньше, чем выше энергия возбужденного состояния.

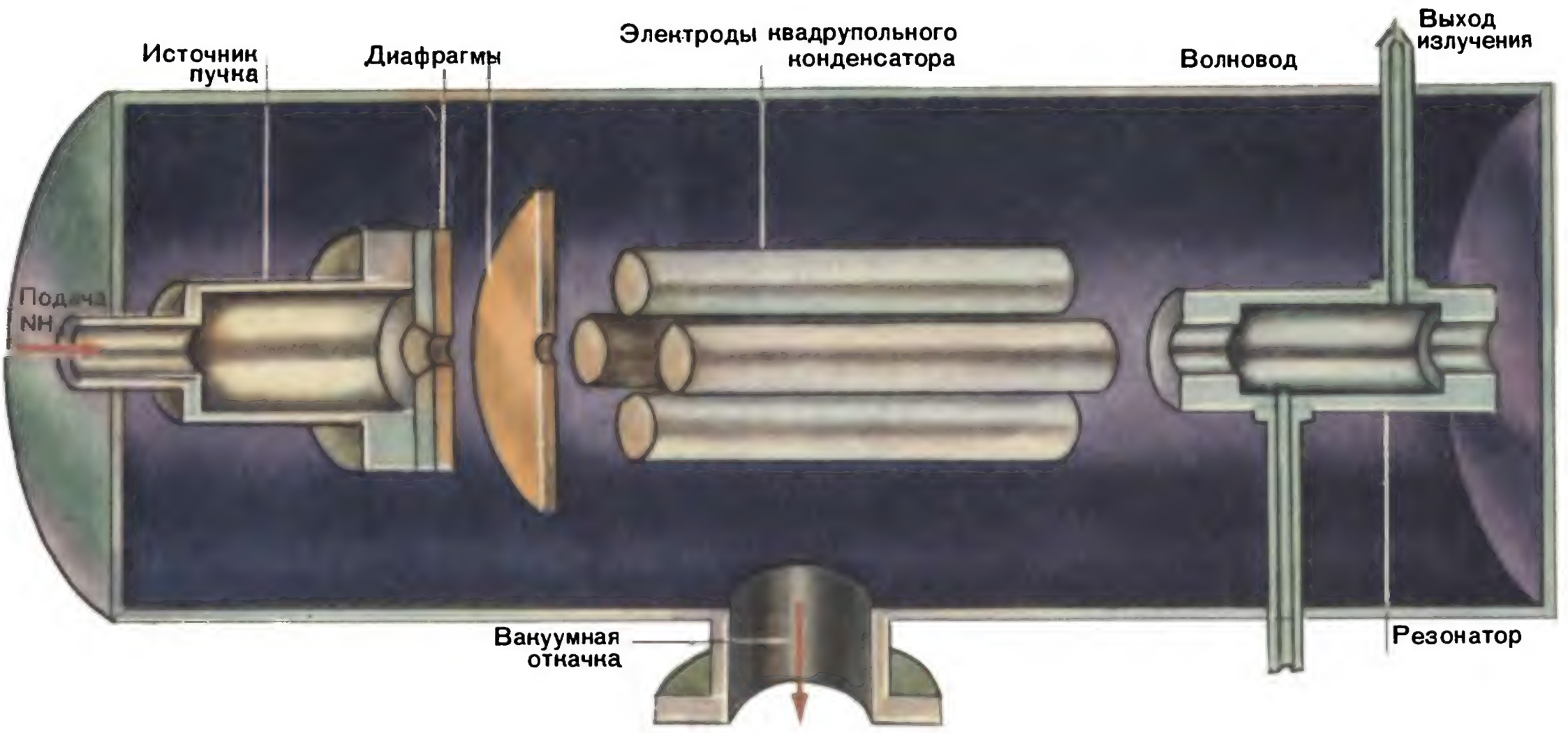
Для того чтобы появилась возможность использовать уникальные свойства вынужденного излучения, необходимо искусственно создать термодинамически неравновесную среду, в которой число возбужденных атомов или молекул будет больше, чем невозбужденных.

В мазерах на молекулярных пучках, или, как их обычно называют, в молекулярных генераторах, такую среду создают путем искусственного отбора из пучка молекул, находящихся в термодинамическом равновесии, только тех молекул, которые находятся в возбужденном состоянии.

Посмотрим, как это делается практически на примере мазера на молекулах аммиака.

В вакуумированную камеру, в которой посредством непрерывной откачки поддерживается вакуум ~ 1 мм рт. ст., непрерывно подается газообразный аммиак NH_3. В результате в камере формируется направленный молекулярный пучок с интенсивностью около 10^{18} молекул в секунду. Искусственный отбор возбужденных молекул аммиака осуществляется пропусканием термодинамически равновесного молекулярного пучка через сортирующую систему, изготовленную в виде квадрупольного конденсатора длиной около 10 см, на который

Схема мазера.



подается напряжение 20—30 кВ (рис.). Возбужденные и невозбужденные молекулы аммиака, пролетая через квадрупольный конденсатор, ведут себя в неоднородном электрическом поле различным образом. Внутренняя энергия возбужденных молекул аммиака в постоянном электрическом поле увеличивается, а невозбужденных — уменьшается. Поэтому, проходя через неоднородное электрическое поле, возбужденные молекулы стремятся попасть в ту область поля, в которой их энергия минимальна: возбужденные молекулы фокусируются к оси конденсатора, где поле равно нулю, а невозбужденные — в область с максимальным электрическим полем, т. е. к электродам. Если электроды конденсатора охлаждать жидким азотом, то невозбужденные молекулы будут к ним «примерзать», а возбужденные — свободно пролетать через конденсатор, фокусируясь в узкий направленный пучок вдоль оси конденсатора. После сортирующей системы формируется пучок с интенсивностью около 10^{13} молекул в секунду, в котором содержатся только возбужденные молекулы. Такой молекулярный пучок представляет собой термодинамически неравновесную активную среду, в которой невозможно поглощение квантов, так как практически в ней нет молекул в основном, невозбужденном состоянии и в то же время возможны спонтанное и вынужденное испускание квантов электромагнитного излучения при переходе молекул из возбужденного состояния в основное (см. *Лазер*).

Третий необходимый элемент молекулярного генератора (кроме источника пучка и сортирующей системы) — высокодобротный объемный резонатор с резонансной частотой, настроенной на частоту электромагнитного излучения, испускаемого возбужденной молекулой при переходе в основное состояние. Чем выше добротность (качество) резонатора, тем дольше не затухают электромагнитные колебания, возбужденные в резонаторе на частоте резонанса. При превышении потоком возбужденных молекул, влетающих в резонатор, некоторой критической величины электромагнитное излучение, возникающее в результате вынужденного испускания, начинает накапливаться в резонаторе, тем самым все более усиливая вынужденное испускание. Благодаря этому процессу число возбужденных молекул уменьшается, а невозбужденных — увеличивается, лавина вынужденных актов испускания начинает приходить к насыщению, которое соответствует выравниванию числа молекул в возбужденном и невозбужденном состояниях на выходе из резонатора и насыщению мощности электромагнитного излучения в резонаторе.

Критическая величина, при которой интенсивность вынужденного испускания в резонаторе начинает возрастать, соответствует потоку 10^{13} молекул в секунду.

Частота электромагнитного излучения аммиачного молекулярного генератора равна 23870 МГц (длина волны $\lambda \simeq 1{,}27$ см), а предельная относительная стабильность частоты линии генерации может достигать величины $\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-13}$ На практике этого значения не удается достигнуть, и обычно стабильность частоты не превышает величину $\sim 10^{-11}$. Высокая стабильность частоты электромагнитных колебаний, генерируемых аммиачным мазером, позволяет использовать его как стандарт частоты для службы точного времени. Погрешность хода часов, стабилизированных по частоте аммиачного лазера, составляет величину порядка 1 с за несколько тысяч лет.

Гораздо большей монохроматичностью излу-

чения обладает мазер на атомах водорода Его устройство во многом аналогично устрой ству мазера на молекулах аммиака.

Длина волны водородного мазера составляет величину, равную 21 см, а точное значение частоты $\nu = 1\,420\,405\,751{,}7860 \pm 0{,}0046$ Гц. Относительная погрешность этой величины весьма мала: $\simeq 3 \cdot 10^{-12}$, по этой причине водородный мазер также используют как стандарт частоты.

Основной недостаток водородного мазера — малая мощность излучения — в тысячи раз меньше мощности аммиачного мазера.

Твердотельные мазеры применяют чаще всего в качестве усилителей электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн. Активная среда в этих мазерах представляет собой кристалл (наибольшее распространение получили мазеры на кристаллах рубина), размещенный в резонаторе, имеющем две резонансные частоты: частоту излучения накачки и частоту усиления. Инверсная населенность уровней в кристалле достигается в результате поглощения кристаллом электромагнитного излучения накачки, длина волны которого меньше длины волны усиления. Главная особенность твердотельных мазеров, называемых еще парамагнитными квантовыми усилителями, состоит в том, что инверсная населенность осуществляется на уровнях, создаваемых искусственно: путем помещения кристалла вместе с резонатором в постоянное магнитное поле. Расстояние между уровнями полностью определяется величиной внешнего магнитного поля. Обычно парамагнитные усилители используют в диапазоне длин волн от 1 до 100 см.

Важнейшее свойство парамагнитных квантовых усилителей — чрезвычайно низкий уровень шума, в 100 раз меньше, чем в лучших усилителях, работающих на других принципах. Наиболее широко парамагнитные усилители применяют в радиоастрономии и радиолокации для усиления слабых радиосигналов.

Мазеры играют важную роль в развитии науки и техники. С их помощью впервые удалось на практике использовать уникальные свойства вынужденного излучения для генерации электромагнитных колебаний. На их основе созданы квантовые стандарты частоты.

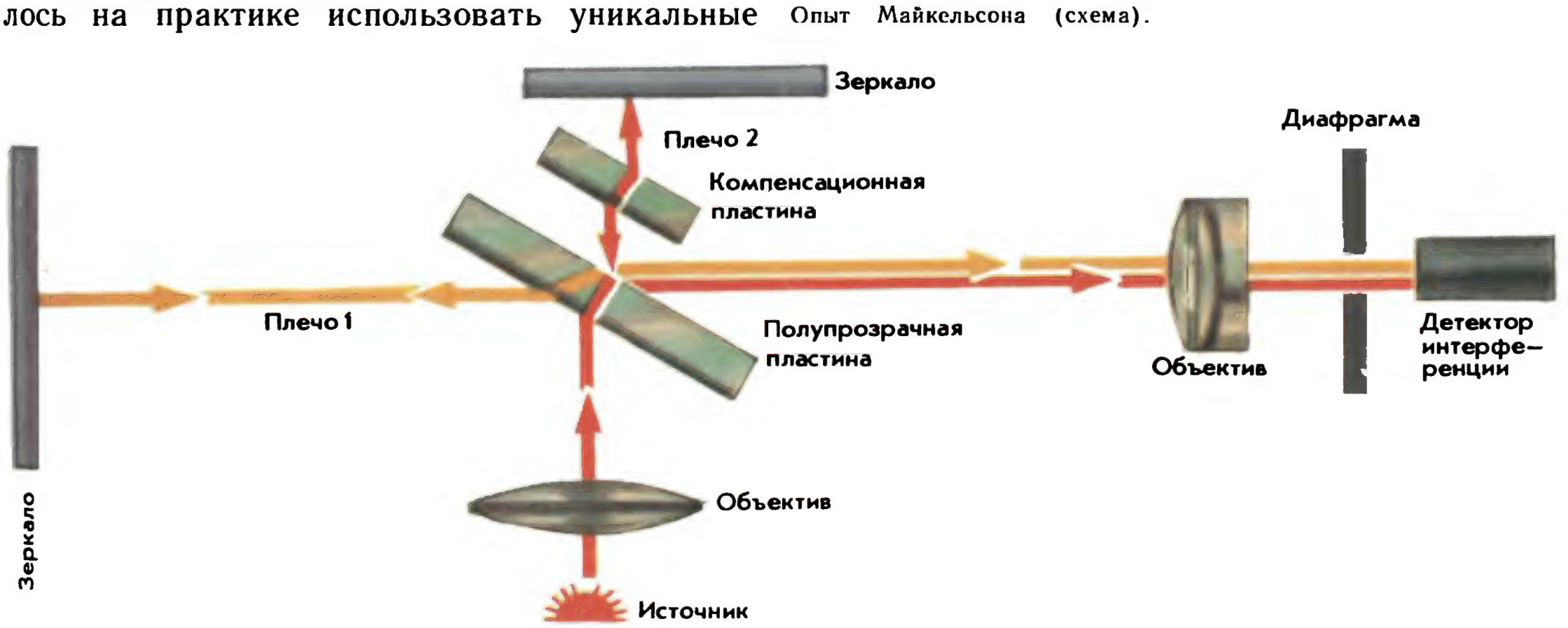
Мазеры открыли эру квантовой электроники. На принципах мазеров были созданы вскоре и первые квантовые генераторы света — *лазеры*.

МАЙКЕЛЬСОНА ОПЫТ

Это один из самых замечательных экспериментов в истории физики. После того как в начале XIX в. была доказана волновая природа света, а к концу столетия установлен факт распространения в пространстве *электромагнитных волн*, все физики были убеждены в реальности эфира — упругой среды, в которой и распространяются электромагнитные колебания. Правда, эфир пришлось наделить очень необычными свойствами. С одной стороны, он должен был обладать качествами идеально твердого упругого тела (это следовало из законов распространения электромагнитных волн), с другой — эфир должен был быть идеально разрежен и проницаем (иначе он неминуемо мешал бы движению небесных тел, а тогда не выполнялись бы законы *тяготения*). Над этими парадоксами эфира размышляли крупнейшие ученые, но тем не менее представить себе распространение поперечных электромагнитных волн вне какой-то реальной упругой среды не мог никто.

К концу XIX в. общее мнение было таково. Существует загадочная всепроникающая среда, в которой свободно «плавают» все тела — планеты, звезды и т. д. Для того чтобы объяснить целую серию экспериментов (и в первую очередь аберрацию света), пришлось предположить, что при движении тела́ не увлекают

Опыт Майкельсона (схема).



эфир, он остается в абсолютном покое. Иными словами, все движения массивных тел сквозь неподвижный эфир совершаются как бы с полным отсутствием *трения*.

Согласно гипотезе неподвижного эфира, можно наблюдать «эфирный ветер» при движении Земли сквозь эфир, и скорость света по отношению к Земле должна зависеть от направления светового луча относительно направления ее движения в эфире.

В связи с этой гипотезой появилась идея эксперимента. Допустим, что свет распространяется в эфире с постоянной скоростью c, причем в вакууме эта скорость не зависит от направления. Наша Земля несется сквозь эфир со скоростью не меньшей чем 30 км/с (скорость вращения Земли вокруг Солнца). Можно поставить опыт так, чтобы один луч света в экспериментальной установке распространялся параллельно и антипараллельно движению Земли, а другой — только перпендикулярно. Эти лучи относительно экспериментальной установки будут иметь разную скорость. Если они пройдут одинаковые пути l, отразятся и вернутся в начальную точку, то затратят разное время.

Причем разность времен $\Delta t \approx \frac{l}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2$

Такой опыт провел в 1881 г. американский физик А. Майкельсон, использовавший изобретенный им прибор — интерферометр. Одно плечо интерферометра направлялось по движению Земли, другое — перпендикулярно к нему. Прибор позволял установить, что один из лучей запоздал или обогнал другой на время $\Delta t \approx 10^{-15} - 10^{-16}$с. Это эквивалентно тому, что он пробежал путь длиннее на несколько сотых долей микрометра.

Но сравнивать пути пробега с такой немыслимой точностью и не было необходимости. Достаточно было показания интерферометра, что лучи I и II набрали на своем пути какую-то разность хода. Затем весь прибор поворачивался на 90° так, что лучи I и II менялись местами. Тот, что бежал вдоль и против движения Земли, теперь распространялся перпендикулярно. А перпендикулярный луч II двигался, как луч I. В случае существования неподвижного эфира картина интерференции во втором эксперименте была бы иной, чем в первом, и это изменение отметил бы интерферометр.

Но результат этого эксперимента был отрицательным.

В дальнейшем опыт Майкельсона неоднократно повторялся, и всегда результат был одинаковым. Разность хода световых лучей, следующая из теории неподвижного эфира, не была обнаружена. Это означало, что движение Земли никак не влияет на распространение света.

Опыт Майкельсона послужил одним из экспериментальных фактов, положенных в основу *теории относительности*.

МАССА

Массой тела называют физическую величину, равную отношению действующей на тело *силы* к приобретенному им ускорению: $m = F/a$. При обычных условиях (скорости тел много меньше скорости *света* $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) это отношение оказывается постоянным.

Выведенная на основании второго закона Ньютона масса определяет инертные свойства тела, и поэтому ее называют инертной массой. Существует также понятие гравитационной (тяжелой) массы — физической величины, определяющей меру гравитационного взаимодействия рассматриваемого тела с другими телами, скажем с Землей. В формулировке закона всемирного *тяготения*, утверждающего, в частности, что любой объект на расстоянии r от своего центра масс создает гравитационное ускорение:

$$a_G = \frac{Gm}{r^2}, \qquad (1)$$

гравитационная масса присутствует в приведенной формуле в виде множителя m. Входящая в формулу (1) величина G называется гравитационной постоянной, численное значение которой зависит от выбора системы единиц; в системе СИ $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Согласно данному определению закона всемирного тяготения, в принципе возможно, например, измерить гравитационное ускорение, которое вызывает эталон массой в 1 кг, и всякому объекту, вызывающему такое же ускорение на том же расстоянии, можно приписать массу в 1 кг.

Определения инертной и гравитационной масс на первый взгляд весьма различны. Инертная масса, характеризующая способность тела «сопротивляться» внешним воздействиям, играет пассивную роль; гравитационная же масса порождает притяжение, т. е. является активным началом.

На протяжении сотен лет ученых волновал вопрос: эквивалентны ли эти два понятия? Классический опыт проверки эквивалентности инертной и гравитационной масс осуществил И. Ньютон и описал его в «Математических началах натуральной философии»:

«Я испытывал золото, серебро, свинец, стекло, песок, поваренную соль, дерево, воду и пшеницу. Я достал два одинаковых ящика. Я наполнил один из них деревом, а в центре качаний другого поместил такого же (насколько точно я мог) веса кусок золота. Подвешенные на нитях длиной 11 футов ящики образовали пару маятников, совершенно одинаковых по весу и форме и одинаково подверженных сопротивлению воздуха; поместив их рядом, я наблюдал,

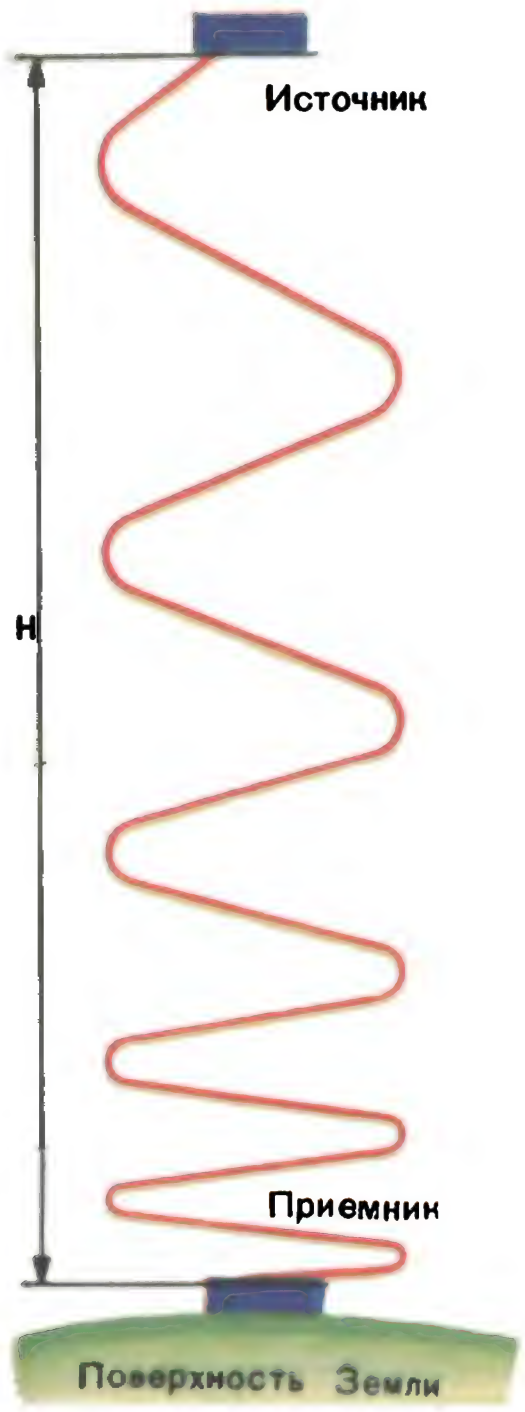


Схема эксперимента Паунда и Ребке.

как они качались совместно взад и вперед в течение длительного времени с одинаковыми колебаниями. И потому (в силу Следствий I и VI, Предложение XXIV, Книга II) количество вещества в золоте относилось к количеству вещества в дереве, как действие движущей силы на все золото к действию движущей силы на все дерево; другими словами, как вес одного к весу другого.

И с помощью этих опытов в телах одинакового веса можно было обнаружить различие в количествах вещества, составляющее одну тысячную общего количества».

После опытов Ньютона техника измерения инертной и гравитационной масс совершенствовалась и точность их возрастала.

В настоящее время в опытах советских физиков В. Б. Брагинского и В. И. Панова эквивалентность гравитационной и инертной масс доказана с точностью до 10^{-12}, что в миллиард раз превышает точность описанного Ньютоном опыта.

Единство природы инертной и гравитационной масс, а следовательно, и установленный в экспериментах факт их численного совпадения были объяснены А. Эйнштейном. Он в своей *теории относительности* придал понятию массы новый смысл, связав массу тела с содержащейся в нем энергией E:

$$m = E/c^2. \qquad (2)$$

Из данного определения следует: если масса покоя тела равна m_0, то это означает, что в нем заключена энергия $E_0 = m_0c^2$, которую называют энергией покоя. Согласно этому определению, масса тела оказывается зависящей от его скорости v:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (3)$$

(при огромных скоростях, сравнимых со скоростью света).

Как известно, энергия *фотона* определяется его частотой ν: $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. С другой стороны, согласно формуле Эйнштейна, $E = mc^2$. Сравнение этих двух формул приводит к выводу, что фотон обладает инертной массой, равной $h\nu/c^2$ (ее нужно отличать от массы покоя, которая, конечно, равна нулю).

В 1960 г. американские ученые Паунд и Ребке выполнили тончайший эксперимент, показавший, что фотон обладает также и гравитационной массой, которая равна инертной массе. Если фотон с частотой ν испускается на высоте H над Землей по направлению к центру Земли, то на уровне земной поверхности его кинетическая энергия $h\nu'$ увеличивается за счет уменьшения потенциальной энергии. Из *закона сохранения энергии* имеем:

$$h\nu' = h\nu + mgH = h\nu + \frac{h\nu}{c^2}gH. \qquad (4)$$

Здесь предполагается, что в процессе падения масса фотона $m = \frac{h\nu}{c^2}$ не меняется. Таким образом, к приемнику подлетел фотон с частотой ν, отличной от той, с которой он был испущен источником. При $H = 20$ м

$$\frac{\nu' - \nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} \simeq 2 \cdot 10^{-15} \text{ (!)}$$

Столь тонкий эксперимент был проведен с помощью *эффекта Мессбауэра.*

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ

Долгое время оставался загадкой вопрос, почему атомные веса многих химических элементов дробные. Английский ученый Ф. Содди в 1910 г. предположил, что существуют *атомы* с одинаковыми химическими свойствами, но разными *массами.* Теперь такие атомы называют *изотопами.*

Требовались экспериментальные доказательства гипотезы Содди. Прошло почти 10 лет, прежде чем английский физик Ф. Астон сумел электрическим и магнитным полем «взвесить» атомы неона. Оказалось, что природный неон состоит из смеси изотопов, главным образом, с массовыми числами 20 и 22. Массы атомов Астон измерил с помощью масс-спектрометра — прибора, определяющего массу по отклонению иона в магнитном поле.

На рис. 1 представлено устройство масс-спектрометра Демпстера. Из источника ионов

Рис 1. Масс-спектрометр Демпстера. *ИИ* — источник ионов; $Д_1$ $Д_2$ — диафрагмы, *R* — радиус центральной орбиты; *ЦФ* — цилиндр Фарадея, К — вакуумная камера.

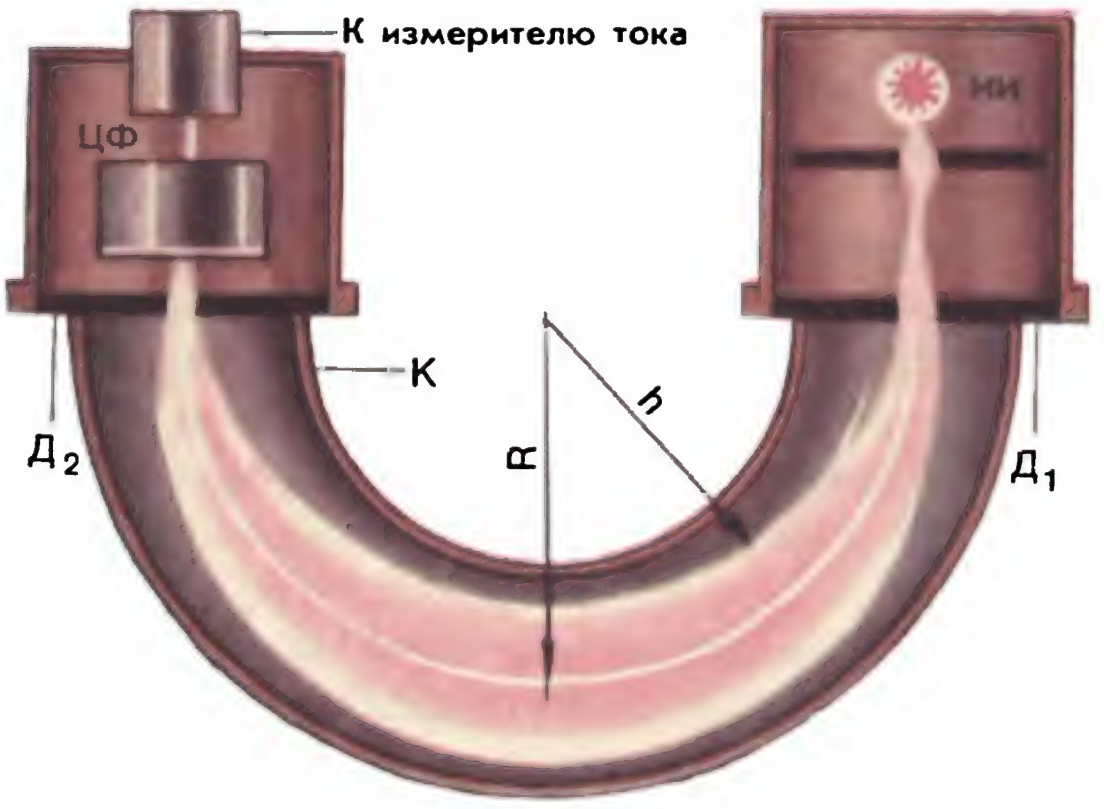
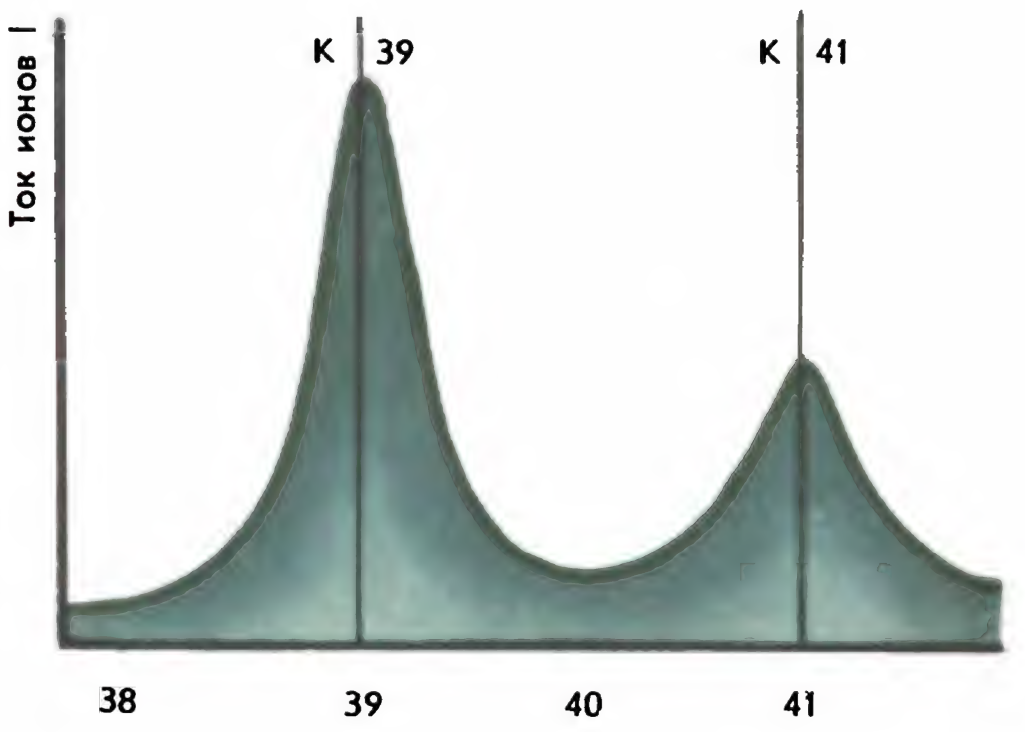


Рис 2. Ток ионов калия сквозь щель масс-спектрометра в зависимости от массы регистрируемого иона.



(ИИ) выходят однозарядные ионы исследуемого элемента, ускоряются в промежутке 1—2 до энергии eV и движутся по траектории с радиусом r. Если магнитное поле h постоянно, то кривизна траектории иона зависит только от величины V. Когда V подобрано так, что $r = R$, из щели Д выходит максимальный ток, а масса иона будет равна $M = R^2(H^2e/2Vc^2)$. Такой спектрометр весьма точно измеряет массу атомов (рис. 2).

Современные масс-спектрометры измеряют массы ядер с погрешностью порядка одной десятимиллионной атомной единицы. По значениям масс ядер получают сведения о «прочности» ядра — энергии, необходимой для разделения его на отдельные нуклоны или какие-либо другие комбинации (см. *Ядро атомное*).

Массы ядер отражены в специальных таблицах. Так, масса M_{Sn} изотопа олова $^{126}_{50}$ Sn равна 125,907662 ± 0,000012 а. е., а энергия связи нуклонов $[(50M_p + 76M_n) - M_{Sn}] \cdot c^2 = 1063{,}922$ МэВ. (M_p и M_n — массы *протона* и *нейтрона*.) На каждый нуклон приходится по 8,4 МэВ энергии.

Ядерные нуклоны в миллионы раз прочнее связаны, чем атомные *электроны*.

МАТЕРИЯ

В философии существует категория материи, которая используется для обозначения объективной реальности, существующей независимо от человеческого восприятия. В физике под понятием *материя* понимают все виды существования вещества. Как известно, вещество может находиться в различных агрегатных состояниях (твердом, жидком, газообразном и плазменном).

Изучением свойств вещества в его различных агрегатных состояниях занимаются физика *твердого тела*, физика *жидкостей* и *газов*, физика *плазмы*. Свойства и структуру материи на микроскопическом уровне изучают *атомная физика, ядерная физика*, физика *элементарных частиц*. Распределение и структуру материи во Вселенной изучает *астрофизика*.

Современная физика достигла колоссальных успехов в исследовании свойств материи на микроскопическом уровне. Сегодня структура материи известна вплоть до таких малых масштабов, как $l_0 \simeq 10^{-16}$ см. Чтобы было ясно, насколько мала эта величина, напомним, что размеры *атомов* в сотни миллионов раз больше и даже размер атомного ядра в тысячи раз больше, чем l_0. Однако, какова структура материи в масштабах, меньших чем l_0, науке пока не известно. Для ответа на этот вопрос необходимо строительство все более и более мощных *ускорителей заряженных частиц*, позволяющих изучать структуру частиц при очень высоких энергиях.

Каково распределение материи во Вселенной в современную эпоху? Мы живем на Земле, масса которой приблизительно равна $M_\oplus \simeq 6 \cdot 10^{27}$ г, радиус $R_\oplus \simeq 6400$ км и, таким образом, средняя плотность $\rho_\oplus \simeq 5{,}5$ г/см^3. Земля — одна из девяти планет Солнечной системы. Наша звезда — Солнце — имеет массу $M_\odot \simeq 2 \cdot 10^{33}$ г, радиус $R_\odot \simeq 6{,}9 \cdot 10^5$ км, среднюю плотность $\rho_\odot \simeq 1{,}4$ г/см^3, находится от Земли на расстоянии, приблизительно равном $1{,}5 \cdot 10^{13}$ см, которое свет проходит за 499 с = 0,0058 сут. Это расстояние называют астрономической единицей и сокращенно обозначают а. е. Самая далекая от Солнца планета Плутон находится от него на расстоянии, приблизительно равном 39,75 а. е.

Солнце вместе с его планетной системой — это лишь одна из звезд нашей Галактики. Наша звездная система состоит приблизительно из $2 \cdot 10^{11}$ звезд. Если бы мы могли взглянуть на нее со стороны, то увидели бы, что наша Галактика представляет собой дископодобное образование, утолщающееся к центру.

СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН
БАРЕНЦЕВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
МОРЕ ЛАПТЕВЫХ
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ
ЧУКОТСКОЕ МОРЕ
БЕРИНГОВО МОРЕ
ОХОТСКОЕ МОРЕ
ЯПОНСКОЕ МОРЕ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
Земля Франца-Иосифа
Новая Земля
Северная Земля
Новосибирские о-ва
о. Врангеля
о. Колгуев
о. Сахалин
к востоку от Гринвича 180° к западу от Гринвича
МОСКВА
ВАРШАВА
БЕРЛИН
ПРАГА
ВЕНА
БУДАПЕШТ
БУХАРЕСТ
КОПЕНГАГЕН
БОНН
СТОКГОЛЬМ
ХЕЛЬСИНКИ
ТЕГЕРАН
КАБУЛ
УЛАН-БАТОР
Ботнический залив
Мурманск
Архангельск
Воркута
Диксон
Норильск
Усть-Хантайская
Игарка
Северный полярный круг
Верхоянск
Оймякон
Колыма
Омсукчан
Певек
Анадырь
Билибинская
Чаунская
Угловинская
Командорские о-ва (СССР)
Петропавловск-Камчатский
Паужетская (геотермальная)
Ока
Южно-Сахалинская
Южно-Сахалинск
Курильские о-ва (СССР)
Комсомольск-на-Амуре
Хабаровск
Амурск
Приморская
Артемовская
Партизанск
Владивосток
Зейская
Бурейская
Чульманская
Нерюнгринская
Якутская
Мирный
Вилюйская
Усть-Илимская
Богучанская
Ангара
Мамаканская
Железногорск-Илимский
Братская им. 50-летия Великого Октября
Красноярская им. 50-летия СССР
Березовская
Усолье-Сибирское
Саяно-Шушенская
Иркутская
Ангарск
Иркутск
Братск
Красноярск
Назарово
Кемерово
Томь-Усинская
Южно-Кузбасская
Кузнецкая
Новосибирск
Барабинская
Омск
Тобольск
Тюмень
Сургут
Нижневартовск
Нижняя Тура
Серовская
Верхотурская
Рефтинская
Среднеуральская
Челябинск
Южноуральская
Курган
Курчатова
Ишим
Петропавловск
Ирбитская
Рустая
Ирбит
Ишимская
Целиноград
Экибастуз
Усть-Каменогорск
Бухтарминская
Караганда
Павлодар
Барнаул
Семипалатинск
Джезказган
Балхаш
оз. Балхаш
Илийская
Капчагайская
Алма-Ата
Фрунзе
Токтогульская
Ала-Бельская
Нарынская
Курпсайская
Чарвакская
Ташкентская
Ферганская
Сырдарьинская
Шардаринская
Чирчик-Бозсуйские
Чарвакская
Джамбул
Чимкент
Кзыл-Орда
Ташкент
Фархадская
Ахангаранская
Ташкентская им. 50-летия СССР
Ахангаран
Ангрен
Коканд
Ферганская
Андижан
Наманган
Ош
Сурхобская
Нурекская
Душанбе (геотермальная)
Рогунская
Кайраккумская
Ашхабад
Безмеинская им. В.И. Ленина
Мары
Таджерабадская
Тахиаташ
Амударья
Красноводск
Шевченко
Баку
Мингечаурская им. В.И. Ленина
Сальянская
Ленинаканская
Разданская
Севанская
Ереванская
Арпинская
Ереван
Гюмри
Тбилисская
Ингурская
Зугдидская
Сухумская
Гурьев
Актюбинск
Орск
Оренбург
Самара
Саратов
Волгоград
Волжский
Балаково
Ульяновск
Тольятти
Жигулевская
Чебоксарская
Казань
Нижнекамская
Заинская
Альметьевская
Бугульминская
Елабужская
Набережные Челны
Пермская
Чайковская
Воткинская
Камская
Киров
Кировская
Нижняя Тагил
Среднеуральская
Верхнетагильская
Рефтинская
Серов
Ивдельская
Ивдель
Печора
Инта
Усть-Усинская
Сыктывкар
Котласская
Солигорская
Новгородская
Ленинградская
Кингисеппская
Псковская
Гдовская
Выборгская
Кондопожская
Беломорская
Кольская
Апатитская
Мончегорская
Печенгская
Борисоглебская
Кировская
Ярославская
Костромская
Смоленская
Конаковская
Калининская
Дубненская
Рижская
Вильнюсская
Каунасская
Электренайская
Литовская
Игналинская
Гродненская
Минская
Витебская
Полоцкая
Лукомльская
Могилевская
Мозырская
Гомельская
Брянская
Тульская
Щекинская
Ново-Тульская
Рязанская
Ново-Рязанская
Ново-Воронежская
Воронежская
Курская
Белгородская
Старооскольская
Запорожская
Каховская
Крымская
Симферопольская
Ставропольская
Невинномысская
Ростовская
Таганрогская
Донецкая
Углегорская
Зуевская
Старобешевская
Грозненская
Гудермесская
Чиркейская
Дагестанская
Каспийская
Ленинградская
Ленинаканская
Разданская
Севанская
Ереванская
Арпинская
Ереван
Гюмри
Тбилисская
Ингурская
Зугдидская
Сухумская
Шевченко
Баку
Мингечаурская им. В.И. Ленина
Сальянская
Красноводск
Безмеинская им. В.И. Ленина
Ашхабад
Мары
Таджерабадская
Тахиаташ
Амударья
Кзыл-Орда
Сырдарьинская
Шардаринская
Чирчик-Бозсуйские
Чарвакская
Джамбул
Чимкент
Ташкент
Фархадская
Ахангаранская
Ташкентская им. 50-летия СССР
Ахангаран
Ангрен
Коканд
Ферганская
Андижан
Наманган
Ош
Сурхобская
Нурекская
Душанбе (геотермальная)
Рогунская
Кайраккумская
Актюбинск
Орск
Оренбург
Самара
Саратов
Волгоград
Волжский
Балаково
Ульяновск
Тольятти
Жигулевская
Чебоксарская
Казань
Нижнекамская
Заинская
Альметьевская
Бугульминская
Елабужская
Набережные Челны
Пермская
Чайковская
Воткинская
Камская
Киров
Кировская
Нижняя Тагил
Среднеуральская
Верхнетагильская
Рефтинская
Серов
Ивдельская
Ивдель
Печора
Инта
Усть-Усинская
Сыктывкар
Котласская
Солигорская
Новгородская
Ленинградская
Кингисеппская
Псковская
Гдовская
Выборгская
Кондопожская
Беломорская
Кольская
Апатитская
Мончегорская
Печенгская
Борисоглебская
Кировская
Ярославская
Костромская
Смоленская
Конаковская
Калининская
Дубненская
Рижская
Вильнюсская
Каунасская
Электренайская
Литовская
Игналинская
Гродненская
Минская
Витебская
Полоцкая
Лукомльская
Могилевская
Мозырская
Гомельская
Брянская
Тульская
Щекинская
Ново-Тульская
Рязанская
Ново-Рязанская
Ново-Воронежская
Воронежская
Курская
Белгородская
Старооскольская
Запорожская
Каховская
Крымская
Симферопольская
Ставропольская
Невинномысская
Ростовская
Таганрогская
Донецкая
Углегорская
Зуевская
Старобешевская
Грозненская
Гудермесская
Чиркейская
Дагестанская
Каспийская
ВАЖНЕЙШИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
Действующие
Строящиеся
Тепловые
Атомные
Гидроэлектростанции
Солнечная
Каскады ГЭС
Группы ТЭС
Электростанции мощностью 1 млн. кВт и более даны крупным знаком
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 400 кВ И ВЫШЕ
действующие
строящиеся
Единая энергетическая система СССР (ЕЭС СССР)
Объединенные энергетические системы
Средней Азии
Дальнего Востока
Изолированные энергосистемы и энергорайоны в Сибири и на Дальнем Востоке
МОСКВА Центральное диспетчерское управление ЕЭС СССР
Хабаровск Центры диспетчерских управлений объединенных энергетических систем
Масштаб 1:25 000 000
(в 1 см 250 км)
250 0 250 500 750 км
Цифрами на карте обозначены:
1 Каширская им. Кржижановского
2 Новомосковская
3 Нижнекамская
4 Димитровградская
5 Днестровская
6 Южно-Украинская
7 Кременчугская
8 Приднепровская
9 Криворожская
10 Днепродзержинская
11 Днепрогэс им. В.И. Ленина
12 Углегорская
13 Кураховская
14 Зуевская
15 Старобешевская
16 Грозный
17 Гуматские
18 Мингечаурская им. В.И. Ленина
19 Азербайджанская

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Группы → / Периоды ↓	а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б	а VI б	а VII б	а VIII б
1	H						1 **H** 1,0079 $1s^1$ Водород	2 **He** 4,0026 $1s^2$ Гелий
2	3 **Li** 6,941 $2s^1$ Литий	4 **Be** 9,012 $2s^2$ Бериллий	5 **B** 10,81 $2s^2 2p^1$ Бор	6 **C** 12,011 $2s^2 2p^2$ Углерод	7 **N** 14,0067 $2s^2 2p^3$ Азот	8 **O** 15,999 $2s^2 2p^4$ Кислород	9 **F** 18,998 $2s^2 2p^5$ Фтор	10 **Ne** 20,179 $2s^2 2p^6$ Неон
3	11 **Na** 22,990 $3s^1$ Натрий	12 **Mg** 24,305 $3s^2$ Магний	13 **Al** 26,981 $3s^2 3p^1$ Алюминий	14 **Si** 28,086 $3s^2 3p^2$ Кремний	15 **P** 30,973 $3s^2 3p^3$ Фосфор	16 **S** 32,06 $3s^2 3p^4$ Сера	17 **Cl** 35,453 $3s^2 3p^5$ Хлор	18 **Ar** 39,948 $3s^2 3p^6$ Аргон
4	19 **K** 39,098 $4s^1$ Калий	20 **Ca** 40,08 $4s^2$ Кальций	21 **Sc** 44,956 $3d^1 4s^2$ Скандий	22 **Ti** 47,90 $3d^2 4s^2$ Титан	23 **V** 50,941 $3d^3 4s^2$ Ванадий	24 **Cr** 51,996 $3d^5 4s^1$ Хром	25 **Mn** 54,938 $3d^5 4s^2$ Марганец	26 **Fe** 55,847 $3d^6 4s^2$ Железо; 27 **Co** 58,933 $3d^7 4s^2$ Кобальт; 28 **Ni** 58,70 $3d^8 4s^2$ Никель
	29 **Cu** 63,546 $3d^{10} 4s^1$ Медь	30 **Zn** 65,38 $3d^{10} 4s^2$ Цинк	31 **Ga** 69,72 $4s^2 4p^1$ Галлий	32 **Ge** 72,59 $4s^2 4p^2$ Германий	33 **As** 74,921 $4s^2 4p^3$ Мышьяк	34 **Se** 78,96 $4s^2 4p^4$ Селен	35 **Br** 79,904 $4s^2 4p^5$ Бром	36 **Kr** 83,80 $4s^2 4p^6$ Криптон
5	37 **Rb** 85,468 $5s^1$ Рубидий	38 **Sr** 87,62 $5s^2$ Стронций	39 **Y** 88,906 $4d^1 5s^2$ Иттрий	40 **Zr** 91,22 $4d^2 5s^2$ Цирконий	41 **Nb** 92,906 $4d^4 5s^1$ Ниобий	42 **Mo** 95,94 $4d^5 5s^1$ Молибден	43 **Tc** 98,906 $4d^5 5s^2$ Технеций	44 **Ru** 101,07 $4d^7 5s^1$ Рутений; 45 **Rh** 102,905 $4d^8 5s^1$ Родий; 46 **Pd** 106,4 $4d^{10}$ Палладий
	47 **Ag** 107,868 $4d^{10} 5s^1$ Серебро	48 **Cd** 112,40 $4d^{10} 5s^2$ Кадмий	49 **In** 114,82 $5s^2 5p^1$ Индий	50 **Sn** 118,69 $5s^2 5p^2$ Олово	51 **Sb** 121,75 $5s^2 5p^3$ Сурьма	52 **Te** 127,60 $5s^2 5p^4$ Теллур	53 **I** 126,904 $5s^2 5p^5$ Иод	54 **Xe** 131,30 $5s^2 5p^6$ Ксенон
6	55 **Cs** 132,905 $6s^1$ Цезий	56 **Ba** 137,34 $6s^2$ Барий	57 **La** 138,905 $5d^1 6s^2$ Лантан	72 **Hf** 178,49 $5d^2 6s^2$ Гафний	73 **Ta** 180,948 $5d^3 6s^2$ Тантал	74 **W** 183,85 $5d^4 6s^2$ Вольфрам	75 **Re** 186,207 $5d^5 6s^2$ Рений	76 **Os** 190,2 $5d^6 6s^2$ Осмий; 77 **Ir** 192,22 $5d^7 6s^2$ Иридий; 78 **Pt** 195,09 $5d^9 6s^1$ Платина
	79 **Au** 196,967 $5d^{10} 6s^1$ Золото	80 **Hg** 200,59 $5d^{10} 6s^2$ Ртуть	81 **Tl** 204,37 $6s^2 6p^1$ Таллий	82 **Pb** 207,2 $6s^2 6p^2$ Свинец	83 **Bi** 208,980 $6s^2 6p^3$ Висмут	84 **Po** [209] $6s^2 6p^4$ Полоний	85 **At** [210] $6s^2 6p^5$ Астат	86 **Rn** [222] $6s^2 6p^6$ Радон
7	87 **Fr** [223] $7s^1$ Франций	88 **Ra** 226,025 $7s^2$ Радий	89 **Ac** [227] $6d^1 7s^2$ Актиний	104 **Ku** [261] $6d^2 7s^2$ Курчатовий	105 **Ns** [269] $6d^3 7s^2$	106 $6d^4 7s^2$	107 $6d^5 7s^2$	

Лантаноиды

58 **Ce** 140,12 $4f^1 5d^1 6s^2$ Церий	59 **Pr** 140,908 $4f^3 6s^2$ Празеодим	60 **Nd** 144,24 $4f^4 6s^2$ Неодим	61 **Pm** [145] $4f^5 6s^2$ Прометий	62 **Sm** 150,4 $4f^6 6s^2$ Самарий	63 **Eu** 151,96 $4f^7 6s^2$ Европий	64 **Gd** 157,25 $4f^7 5d^1 6s^2$ Гадолиний	65 **Tb** 158,925 $4f^9 6s^2$ Тербий	66 **Dy** 162,50 $4f^{10} 6s^2$ Диспрозий	67 **Ho** 164,930 $4f^{11} 6s^2$ Гольмий	68 **Er** 167,26 $4f^{12} 6s^2$ Эрбий	69 **Tm** 168,93 $4f^{13} 6s^2$ Тулий	70 **Yb** 173,04 $4f^{14} 6s^2$ Иттербий	71 **Lu** 174,97 $4f^{14} 5d^1 6s^2$ Лютеций

Актиноиды

90 **Th** 232,038 $6d^2 7s^2$ Торий	91 **Pa** [231] $5f^2 6d^1 7s^2$ Протактиний	92 **U** 238,029 $5f^3 6d^1 7s^2$ Уран	93 **Np** [237] $5f^4 6d^1 7s^2$ Нептуний	94 **Pu** [244] $5f^6 7s^2$ Плутоний	95 **Am** [243] $5f^7 7s^2$ Америций	96 **Cm** [247] $5f^7 6d^1 7s^2$ Кюрий	97 **Bk** [247] $5f^8 6d^1 7s^2$ Берклий	98 **Cf** [251] $5f^{10} 7s^2$ Калифорний	99 **Es** [254] $5f^{11} 7s^2$ Эйнштейний	100 **Fm** [257] $5f^{12} 7s^2$ Фермий	101 **Md** [258] $5f^{13} 7s^2$ Менделевий	102 **(No)** [255] $5f^{14} 7s^2$ (Нобелий)	103 **(Lr)** [256] $5f^{14} 6d^1 7s^2$ (Лоуренсий)

Этот диск неоднороден: он имеет спиральную структуру и вращается с переменной угловой скоростью, большей в центральных областях диска, меньшей на его периферии. Расстояния в нашей и других галактиках обычно исчисляются парсеками: 1 парсек (1 пс) $\simeq$ $\simeq 3 \cdot 10^{18}$ см $\simeq$ 3,2 светового года = 206 265 а. е. Толщина Галактики вблизи Солнца приблизительно равна 2000 пс, диаметр ее диска 30 000 пс. Солнце вместе с его планетной системой находится вблизи края Галактики, приблизительно в 10 000 пс от ее центра. Кроме звезд в Галактике имеются и другие виды материи (пыль, межзвездный газ, *космические лучи*), но их мало. Они составляют всего несколько процентов от ее полной массы.

Поскольку, как мы видим, размеры звезд невообразимо малы по сравнению с галактическими масштабами, то Галактику можно рассматривать как очень разреженный газ, в котором роль молекул играют звезды. Этот газ настолько разрежен, что столкновения между его «молекулами» не происходят, или, как говорят, он бесстолкновительный. Естественно, он не ограничен стенками какого-либо сосуда. Почему же он не разлетается? Ответ заключается в том, что вся эта система держится силами собственного *тяготения*. Если мысленно равномерно «размазать» вещество, сосредоточенное в звездах, по всему объему Галактики, то средняя плотность материи в ней окажется приблизительно равной $\rho_Г \simeq$ $\simeq 5 \cdot 10^{-24}$ г/см^3. О степени разреженности галактической материи можно судить на основании следующего простого расчета: если грубо считать, что все вещество в Галактике состоит из водорода, и поделить $\rho_Г$ на массу атома водорода $m_H = 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ г, то легко найти среднюю концентрацию атомов в Галактике. Она приблизительно равна 3 атомам в 1 см^3. Напомним для сравнения, что в нормальных условиях в 1 см^3 газа $2{,}6 \cdot 10^{19}$ молекул.

Мир галактик во Вселенной довольно разнообразен. Таких галактик, как наша (спиральных), приблизительно 80%. Кроме них встречаются и галактики других типов, например, неправильные, т. е. имеющие достаточно произвольные геометрические очертания, и эллиптические, близкие по форме к эллипсоидам различной вытянутости. Число звезд может довольно сильно меняться от галактики к галактике. Карликовые галактики имеют приблизительно 10^9 звезд, гигантские — до 10^{14} звезд. Большинство же галактик похоже на нашу и содержит приблизительно $10^{11} \div$ $\div 10^{12}$ звезд.

Как распределена материя в масштабах, значительно превышающих размеры галактик? Можно поставить вопрос и иначе: какова вообще иерархия структур, образуемых материей во Вселенной?

Оказывается, одиночные галактики встречаются редко. Подавляющее большинство их образует скопления, насчитывающие сотни и тысячи членов. Скопления не «рассыпаются» на отдельные галактики по тем же причинам, по которым галактики не «рассыпаются» на отдельные звезды. И те и другие держатся силами собственного тяготения, или, как говорят, являются гравитационно связанными объектами. Размеры скоплений галактик исчисляются мегапарсеками (Мпс), т. е. миллионами парсек. Скопления галактик, в свою очередь, образуют сверхскопления, содержащие десятки членов. Может быть, нашему продвижению вверх по лестнице масштабов космических структур не будет конца? Например, сверхскопления должны объединяться в сверхсверхскопления и т. д.? Оказывается, что это не так. Согласно данным современных астрономических наблюдений, сверхскопления являются наиболее крупными структурными образованиями в Метагалактике — наблюдаемой части Вселенной. Галактики, их скопления, сверхскопления — это элементы ячеистой структуры. Размеры ячеек — сотни мегапарсек, толщина их стенок порядка 2 — 4 Мпс. Крупные скопления располагаются в узлах ячеек. Сверхскопления представляют собой элементы этой ячеистой структуры. В масштабах, превышающих тысячи мегапарсек, Вселенная бесструктурна. Более того, можно утверждать, что в таких масштабах она вообще однородна и изотропна, т. е. ее свойства везде одинаковы. Здесь нет противоречия с тем, что в меньших масштабах (сравнимых с размерами планет, звезд, галактик, их скоплений) это не так. Точно так же можно говорить, например, об однородном распределении плотности помещенного в сосуд газа, хотя в малых, сравнимых с размерами отдельных молекул масштабах однородность, конечно, резко нарушается.

Всегда ли распределение материи во Вселенной было и будет таким, как сейчас? Ответ отрицателен. Отрицателен он потому, что Вселенная эволюционирует. В современную эпоху она расширяется (см. *Космология*). Например, скопления галактик, отстоящие друг от друга на расстоянии в 1 Мпс, разлетаются с относительной скоростью, близкой к 75 км/с. В процессе расширения средняя плотность материи во Вселенной ρ уменьшается. Этот процесс будет продолжаться неограниченно долго, если ρ меньше (либо равна) некоторого критического значения $\rho_{крит} \simeq 10^{-29}$ г/см^3. В противном случае расширение через 20—30 млрд. лет сменится сжатием, и средняя плотность материи во Вселенной начнет возрастать. Что можно сказать о величине ρ? Средняя по всей Вселенной плотность материи, входящей в галактики, оценивается, согласно астрономическим наблюдениям, как $\rho_1 = 0{,}038\rho_{крит}$. Если снова грубо считать, что все вещество состоит

из водорода, и разделить ρ_1 на m_H, то найдем, что в 1 м^3 пространства Вселенной содержится в среднем приблизительно 1 атом водорода. В значительно большем количестве представлены реликтовые *фотоны* — кванты электромагнитного излучения, существовавшего во Вселенной уже в самом начале ее расширения. В том же 1 м^3 пространства таких фотонов сотни миллионов, т. е. частиц излучения во Вселенной гораздо больше, чем атомов обычного вещества. Однако их вклад в величину ρ, исчисленную в г/ см^3, в тысячи раз меньше, чем ρ_1.

Вместе с тем материя во Вселенной, возможно, существует и в каких-то других, трудно доступных наблюдениям формах. Например, есть основания полагать, что во Вселенной может быть много *нейтрино*. Эти частицы настолько слабо взаимодействуют с веществом, что, если даже плотность нейтрино во Вселенной $\rho_H > \rho_{крит}$, все равно прямыми физическими методами обнаружить их невозможно при современном уровне развития техники. Поэтому вопрос о будущем Вселенной на сегодняшний день открыт.

Каково ее прошлое? Вселенная расширяется уже примерно 15—20 млрд. лет. Через 0,0001 с после начала расширения средняя плотность материи во Вселенной приблизительно равнялась $\rho \simeq \rho_{яд} \simeq 10^{14}$ г/см^3 ($\rho_{яд}$ — плотность жидкости, состоящей из одних только *атомных ядер* и поэтому такой плотной).

Через 0,0001 с после начала расширения температура материи была порядка 10^{12} К, и она состояла из излучения и *плазмы* — заряженных и нейтральных элементарных частиц и античастиц (см. *Антивещество*). В этой плазме имелся ничтожно малый избыток частиц над античастицами (примерно одна лишняя частица на $10^8 \div 10^9$ пар). После аннигиляции пар частиц — античастиц во Вселенной осталось излучение и вещество, обязанное своим происхождением этому малому избытку. В первые несколько минут после начала расширения в термоядерных реакциях (см. *Термоядерный синтез*) синтезировались самые легкие химические элементы — *изотопы* водорода и гелия. Далее в процессе расширения температуры вещества и излучения и их плотности уменьшались.

В конце концов во Вселенной возникла иерархия структур, о которой говорилось выше.

МГД-ГЕНЕРАТОР

Первый магнитогидродинамический генератор тока был испытан еще в 1832 г. английским физиком М. Фарадеем, который пытался обнаружить возникновение электродвижущей силы (ЭДС) между двумя электродами, опущенными в воды реки Темзы вблизи моста Ватерлоо в Лондоне. Действительно, согласно только что открытому Фарадеем закону электромагнитной индукции, движение проводника (в данном случае слабо солоноватой речной воды) в магнитном поле Земли должно было сопровождаться возникновением ЭДС и электрического тока в проводниках, соединяющих электроды. Измерительная техника, которой обладал Фарадей, не позволила ему обнаружить ожидаемый эффект, но по существу данный эксперимент содержал все принципиальные элементы современного МГД-генератора тока: движущееся по каналу проводящее вещество, поперечное магнитное поле, токосъемные электроды.

Эффект электромагнитной индукции используется и в обычных источниках тока — электромашинных генераторах, где поперек магнитного поля движутся жесткие проводники, размещенные на вращающемся роторе. В отличие от них в МГД-генераторе жесткие проводники заменены проводящей жидкостью или газом. Какие преимущества при этом возникают? Ротор электромашинного генератора вращает паровая турбина или другой тепловой двигатель, в котором тепловая энергия превращается в механическую. МГД-генератор позволяет непосредственно превращать тепловую энергию в электричество без промежуточных сложных устройств типа паровой турбины или двигателя внутреннего сгорания.

Почему же до сих пор используют обычные генераторы? Проблема заключается в создании необходимого «рабочего тела» для МГД-генераторов. Жидкие *металлы* неудобны в обращении, да и не так просто заставить их двигаться по каналу с большими скоростями. Поэтому МГД-генераторы на жидких металлах не получили широкого распространения. Чаще применяются МГД-насосы для жидких металлов и других проводящих жидкостей, устройства, где электрический ток вызывает движение проводящей жидкости, а не наоборот, как в генераторе. Проводимость же *газов* ничтожно мала. Она возрастает лишь тогда, когда газ, нагреваясь, начинает ионизоваться и превращаться в *плазму*. Но для получения достаточной электропроводности даже при использовании самых легко ионизуемых веществ — паров щелочных металлов — необходимы температуры в 2000—3000° С. Такие высокие температуры достигаются в струе ракетного двигателя, и на его основе, действительно, получаются хорошие МГД-генераторы, компактные и очень мощные устройства. Однако токосъемные электроды таких генераторов при столь высоких температурах могут работать лишь очень короткое время — секунды или в лучшем случае десятки секунд. С использованием ракетных двигателей уже созда-

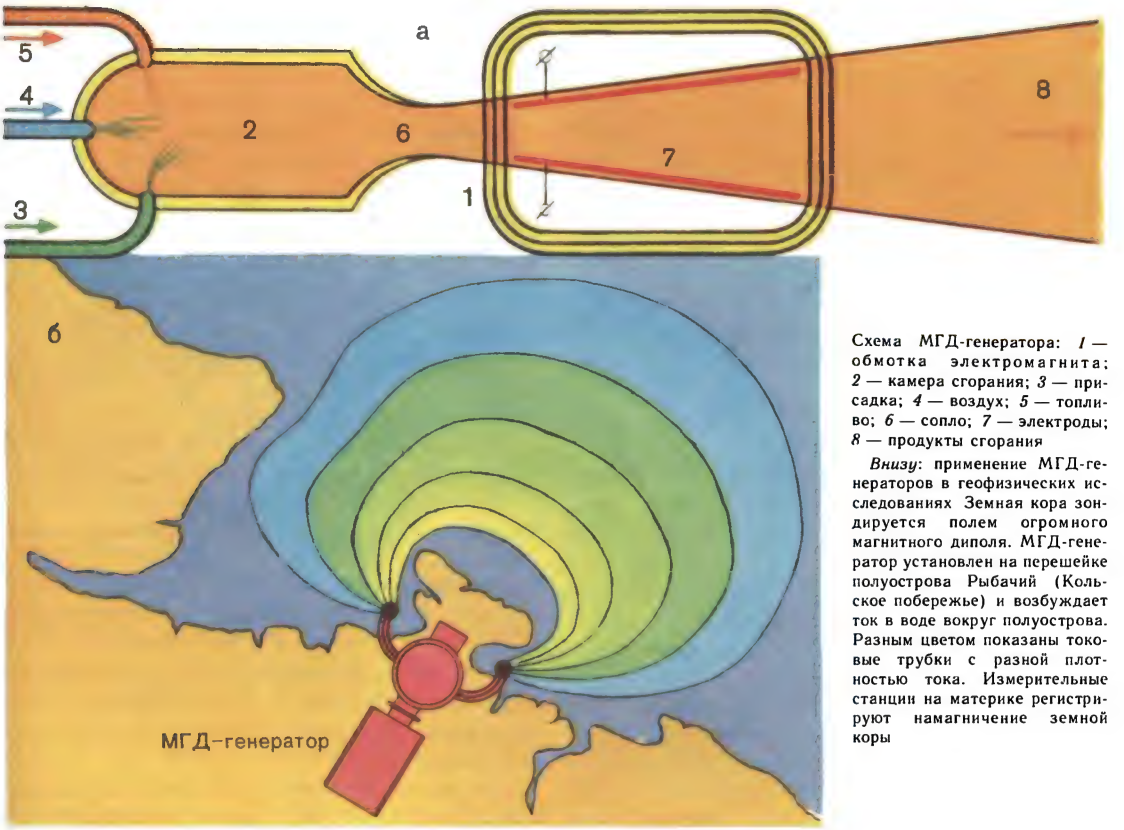


Схема МГД-генератора: *1* — обмотка электромагнита; *2* — камера сгорания; *3* — присадка; *4* — воздух; *5* — топливо; *6* — сопло; *7* — электроды; *8* — продукты сгорания

Внизу: применение МГД-генераторов в геофизических исследованиях Земная кора зондируется полем огромного магнитного диполя. МГД-генератор установлен на перешейке полуострова Рыбачий (Кольское побережье) и возбуждает ток в воде вокруг полуострова. Разным цветом показаны токовые трубки с разной плотностью тока. Измерительные станции на материке регистрируют намагничение земной коры

ны МГД-генераторы, рассчитанные на очень большие мощности и малую длительность работы. Они находят применение, например, для геофизических исследований.

Для того чтобы использовать МГД-генераторы в большой энергетике, необходимо найти способ получения хорошей электропроводности газа при значительно более низких температурах (желательно не выше 1000°), которые могут быть достигнуты в современных высокотемпературных атомных реакторах. В принципе это возможно. Можно иметь неравные температуры ионов и электронов плазмы, например в газоразрядных лампах. Более высокая температура электронов может поддерживаться за счет их нагрева протекающим по плазме электрическим током. Такое состояние плазмы в канале МГД-генератора оказывается, однако, неустойчивым. Плазма разбивается на слои — с хорошей и плохой *проводимостью*, и общая проводимость при этом оказывается малой. (При последовательном соединении проводников их общее сопротивление определяется сопротивлением самого плохого проводника.) Пока не доказано, что возникающая неустойчивость неустранима, и работы в этом направлении продолжаются. Одновременно продолжаются исследования с целью снижения требований к температуре газа и повышения стойкости и рабочего ресурса электродов при повышенных температурах. Электростанции с мощными МГД-генераторами можно было бы использовать для покрытия пиковых нагрузок в электросетях. Первая промышленная МГД-электростанция строится сейчас в нашей стране.

МЕССБАУЭРА ЭФФЕКТ

Энергия *атомного ядра*, так же как и *атома, молекулы* и других квантовых систем, может принимать только дискретный ряд значений (см. *Ядро атомное, Квантовая механика*). При переходах между состояниями с разрешенными энергиями ядро излучает *электромагнитные волны*. Частота этих волн обычно такова, что они лежат в области γ-излучения (см. *Гамма-излучение*). Соответствующие γ-кванты имеют энергию от сотен до нескольких миллионов электронвольт.

Будет ли γ-излучение, испущенное одним ядром, поглощаться точно таким же другим ядром? Казалось бы, энергия γ-кванта как раз и равна разности энергий возбужденного и основного (невозбужденного) состояния и такие кванты должны охотно поглощаться ядром (рис. 1). Но обычно такого р е з о н а н с н о г о п о г л о щ е н и я, характеризуемого условием: $\hbar\omega = E_1 - E_0$, не наблюдают. И причина этого — в энергии отдачи.

Когда стреляют из ружья, оно отскакивает

Рис. 1. Резонансное поглощение γ-квантов ядром.

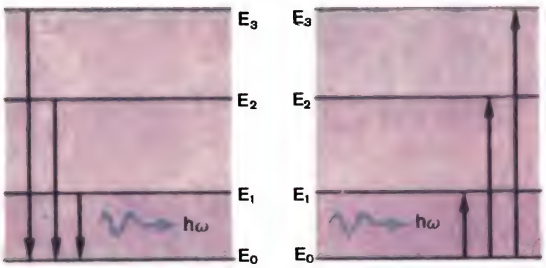


Рис. 2. Схема опыта Мессбауэра.

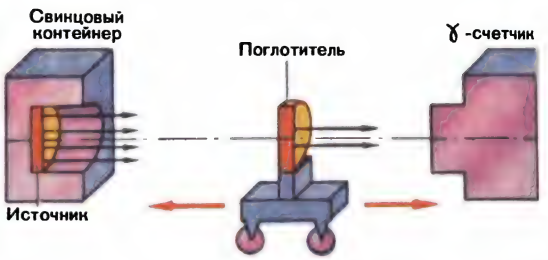


Рис 3. Резонансная кривая счета датчика γ-квантов при движении источника

назад, так как при выстреле ружье получает такой же импульс, как и пуля (по закону сохранения импульса), а следовательно, и некоторую энергию. В нашем случае энергию отдачи $E_{отд}$ получает ядро и, значит, энергия γ-кванта меньше, чем разность энергий уровней $E_1 - E_0$. При поглощении γ-кванта его импульс передается ядру, и оно начинает двигаться. На это также требуется энергия. Поэтому энергии γ-кванта недостаточно, чтобы возбудить ядро, сообщить ему необходимую энергию E_1.

А можно ли все-таки добиться резонансного поглощения? Известно, что чем больше масса ружья, тем меньше энергия отдачи (это легко понять из законов сохранения импульса и энергии). Само ядро сравнительно легкое, и энергия отдачи нарушает условие резонанса. Ну а если взять кристалл, в котором атомы (а следовательно, и ядра) прочно связаны между собой и образуют кристаллическую решетку? В такой системе становится возможной передача импульса при отдаче всему кристаллу. Энергия отдачи при этом ничтожно мала, и происходит резонансное поглощение γ-квантов.

Именно такой эффект был обнаружен в 1958 г. немецким физиком Р. Мессбауэром и носит его имя. В первых опытах Мессбауэр пользовался радиоактивным источником ^{191}Ir, охлажденным до температуры жидкого азота (80 К), и доля резонансных γ-квантов не превышала нескольких процентов.

Почему же так мало квантов попадало в резонанс? Зачем понадобилось охлаждать источник до столь низких температур? Дело в том, что, даже если ядро находится в узле кристаллической решетки, при отдаче могут возбудиться колебания атомов кристалла. А на это тоже приходится тратить энергию. Вероятность процесса уменьшается с понижением температуры, но для ^{191}Ir даже при температуре жидкого азота она велика. В наше время известны радиоактивные соединения, у которых при комнатных температурах доля резонансных γ-квантов составляет почти половину, так что сейчас охлаждать источник приходится лишь в редких случаях.

Эффект Мессбауэра оказался мощным инструментом для исследования свойств *твердых тел*. Идея, принадлежащая самому Мессбауэру, состояла в том, чтобы с помощью механического движения источника «расстроить» резонанс.

Каждая колебательная система характеризуется добротностью — отношением частоты колебательной системы к интервалу частот, при которых еще можно наблюдать резонанс. Например, радиоприемник «ловит» все волны в определенном, хотя и узком, интервале частот, и от соседней станции иногда не так-то просто «отстроиться». Чем лучше радиоприемник, тем острее резонанс и тем выше его добротность.

Атомному ядру также можно приписать определенную добротность. Даже если отдачи нет, оно может поглощать γ-кванты в некотором интервале частот вблизи значения $(E_1 - E_0)$. Точно так же и при излучении γ-квантов имеется небольшое «размытие» частоты. Иначе говорят, что возбужденное состояние имеет естественную ширину линии Г.

Обычно в ядрах $\Gamma \sim 10^{-8}$ эВ. Много это или мало? Надо сравнить с энергией γ-квантов. Например, для распространенного радиоактивного источника изотопа олова ^{119}Sn получаем, что соответствующая добротность равна $0{,}8 \cdot 10^{12}$. Такой огромной добротности не имеет ни один приемник — в лучших случаях в радиотехнических контурах добротность достигает нескольких сотен.

Итак, γ-резонанс обладает очень высокой добротностью. Поэтому достаточно немного сместить частоту γ-квантов — и резонансное поглощение наблюдаться не будет. Изменять частоту излучения можно с помощью *эффекта Доплера*. Для этого необходимо двигать источник (или поглотитель) с определенной ско-

ростью. Схема опыта Мессбауэра показана на рис. 2. Как видно из рис. 3, уже при небольших скоростях источника резонанс расстраивается и показания счетчика γ-квантов, установленного за кристаллом, заметно возрастают.

Зачем же надо расстраивать резонанс?

Прежде всего таким способом легко определить ширину линии Г возбужденного уровня. Для этого нужно с помощью формулы Доплера пересчитать интервал скоростей, при которых наблюдается резонанс, в интервал частот или энергий γ-квантов. Тем самым можно получить важную информацию об «условиях жизни» ядра в кристалле.

На энергию ядерных переходов влияют электрические и магнитные поля внутри кристалла. Обычными способами заметить это не удавалось, но эффект Мессбауэра обладает рекордной чувствительностью, и соответствующее смещение частоты обнаружить легко. Таким образом, эффект Мессбауэра дает точнейший способ регистрации изменений энергий. Имеется целая отрасль науки — мессбауэровская спектроскопия, в развитие которой заметный вклад внесли советские ученые.

С помощью эффекта Мессбауэра американским ученым Паунду и Ребке удалось подтвердить в лабораторных условиях выводы общей *теории относительности*. Квант света, ускоряясь в гравитационном поле, должен увеличивать свою энергию, и его частота смещается к «фиолетовому концу» спектра ($E = \hbar\omega$). Наоборот, замедляясь, он смещается к «красному концу» спектра. Можно подсчитать, что при движении в поле тяжести Земли на расстояние ~ 10 м по вертикали относительное изменение частоты должно составлять $\sim 10^{-15}$. И вот оказалось, что с помощью эффекта Мессбауэра такое смещение удается заметить. γ-резонанс «расстраивается», и, чтобы его восстановить, приходится двигать источник, правда, со скоростью всего лишь несколько микрометров в секунду. Эта величина как раз соответствует смещению частоты, вытекающему из общей теории относительности.

Рис. 1. Зависимость от температуры удельного сопротивления натрия, измеренная на трех разных образцах.

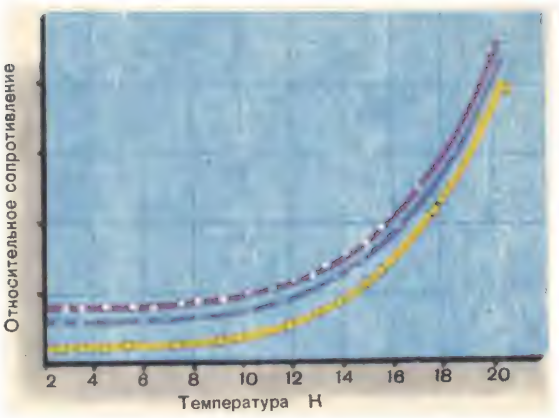
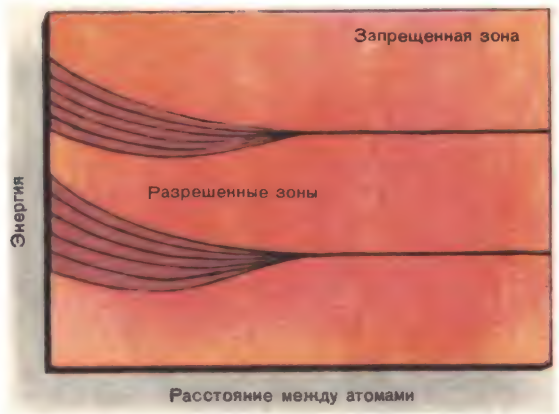


Рис. 2. Трансформация уровней энергии атомов в зоны при объединении атомов в кристалле.



МЕТАЛЛЫ

Обычно под *металлами* понимают вещества, хорошо проводящие электрический ток (обладающие малым электросопротивлением). Это действительно самое характерное свойство металлов, которое отличает их от *диэлектриков* и *полупроводников*. Но можно ли провести четкую границу между всеми этими группами веществ, основываясь только на величине их электропроводности? Если сравнить удельные сопротивления алюминия — $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см и стекла — 10^{12} Ом·см, то они, действительно, отличаются на много порядков. Ну а как быть с висмутом (его удельное сопротивление $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см) и германием (в чистом виде он имеет сопротивление $6 \cdot 10^{1}$ Ом·см, но, вводя специальные примеси, его можно уменьшить на несколько порядков)? Эти вещества по величине электропроводности занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Тем не менее можно утверждать, что висмут — металл, а германий — полупроводник.

Ответ на вопрос, является ли вещество металлом, дает температурная зависимость сопротивления. У металлов электропроводность остается отличной от нуля даже при очень низких температурах (в пределе и при абсолютном нуле) (рис. 1). В противоположность этому полупроводники перестают проводить электрический ток при нулевой температуре.

Такое отличительное свойство металлов связано с особым характером движения *электро-*

Рис. 3. Перенос тока электронами в металле

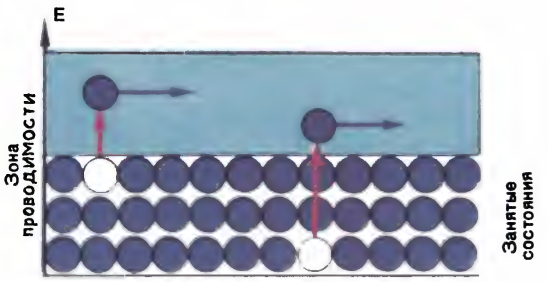
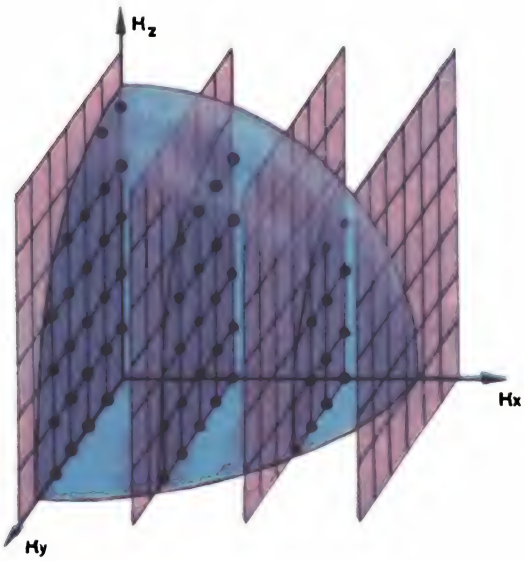


Рис. 4. Поверхность Ферми для свободных электронов — сфера; на рисунке показана ее часть (точками обозначены заполненные состояния).



нов. Электроны подчиняются законам *квантовой механики*, и их энергия может принимать только определенные дискретные значения. В атомах разрешенные значения (уровни) энергии, как известно, определяются постулатами Бора. Сближая два атома, можно образовать *молекулу*. При этом каждый атомный уровень энергии расщепляется на два подуровня.

Чтобы это стало понятным, приведем аналогию с маятником. Каждый маятник имеет одну определенную частоту колебаний ω. В классической *механике* его энергия может принимать любые значения, а у квантового осциллятора только дискретные уровни энергии, расстояние между которыми $\hbar\omega$ (в этом смысле он похож на атом). Если связать два одинаковых маятника (соединить, например, пружинкой), то станут возможными два типа колебаний (колебания разных маятников могут быть в фазе или в противофазе), происходящие с разной частотой. В квантовом случае каждый уровень энергии маятника соответственно расщепляется на два подуровня.

Теперь можно представить, что сближается много атомов (рис. 2). Тогда каждый атомный уровень расщепляется на большое число тесно расположенных подуровней, образующих, как говорят, зону разрешенных значений энергии. Эти зоны разделены областями запрещенных значений энергии (энергетической щелью). Так устроен спектр энергий электронов в *твердом теле*.

Как заполняют электроны уровни энергии? Согласно *принципу Паули*, электроны не могут находиться в одинаковых состояниях. Поэтому они не скапливаются на нижнем уровне энергии, а заполняют все более и более высокие уровни.

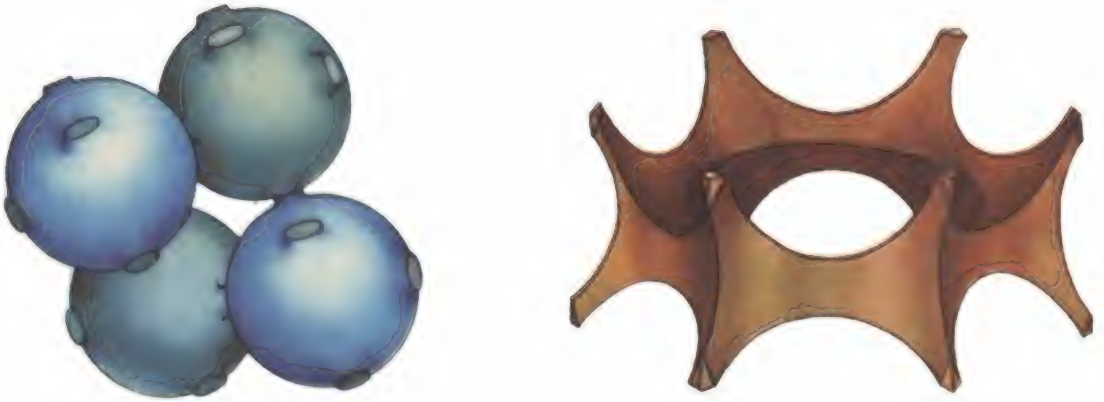
Максимальная энергия, которой обладают электроны, зависит от их концентрации и называется энергией (уровнем) Ферми. Важно, что в металле уровень Ферми лежит внутри зоны разрешенных значений энергий.

Рассмотрим, например, простейший металл — литий. Каждый атом у него состоит из трех электронов, расположенных на двух оболочках (уровнях энергии): на внутренней —2 электрона, на внешней — недостроенной — 1 электрон. При сближении двух атомов лития каждый уровень расщепляется на два подуровня. На нижней паре размещаются 4 электрона, а 2 — располагаются на нижнем подуровне верхнего расщепленного атомного уровня. Верхний подуровень при этом остается свободным. Легко понять, что если объединить много атомов лития, то верхняя зона разрешенных значений энергии окажется заполненной лишь наполовину.

Способность металлов хорошо проводить электрический ток как раз объясняется таким устройством их зонной структуры. Для того чтобы потек электрический ток, электроны должны иметь возможность ускоряться электрическим полем, увеличивать свою энергию. Если зона заполнена не полностью, то энергия электрона может меняться почти непрерывно (электрон при этом переходит на соседний свободный уровень) и электрическое поле легко создает ток (рис. 3). Другое дело, если зона заполнена целиком. Тогда следующий свободный уровень находится далеко — он отделен энергетической щелью, и поле не способно ускорять электроны. В этом случае вещество является диэлектриком. Тепловые возбуждения в диэлектриках могут переводить электроны в верхнюю свободную зону, но число таких возбужденных электронов очень мало.

Движение электронов в металле похоже на движение свободных частиц. Каждый атом отдает один или несколько электронов в коллективное пользование. Хотя эти электроны двигаются сквозь кристаллическую решетку,

Рис. 5. Поверхность Ферми у меди (*а*) близка к сфере, периодически повторяющейся в пространстве, а у цинка (*б*) она состоит из трубок.



а б

состоящую из плотно упакованных ионов, они ведут себя почти как свободные частицы. Волны, описывающие в *квантовой механике* состояние *электронов*, при периодическом расположении ионов распространяются, как в прозрачной среде, не затухая. При этом все влияние кристаллической решетки сводится к изменению *массы* электрона — в металле он обладает эффективной массой, отличной от массы свободного электрона.

Импульс электрона в металле, так же как и энергия, принимает дискретный ряд значений. В состоянии с заданным импульсом могут находиться только 2 электрона с противоположно направленными *спинами (принцип Паули)*. Максимальный импульс электронов называется импульсом Ферми.

Поскольку энергия электрона пропорциональна квадрату импульса ($E = \vec{p}^2/2m$), то электроны при абсолютном нуле занимают все возможные состояния в сфере радиуса p_F (рис. 4). Эта сфера называется поверхностью Ферми. Взаимодействие электронов с кристаллической решеткой в некоторых случаях может привести к сложной форме поверхности Ферми (рис. 5) и к нарушению закона $E = \vec{p}^2/2m$.

Энергия Ферми в хороших металлах — очень большая величина. Она соответствует энергии теплового движения электронов при температурах в несколько тысяч градусов! Поэтому при обычных температурах «размытие» поверхности Ферми вследствие тепловых возбуждений невелико. Этим обстоятельством объясняется сравнительно малая величина *теплоемкости* электронов. Если бы электроны подчинялись классическим законам, то молярная теплоемкость электронного газа равнялась бы $3R/2$ и добавлялась к теплоемкости кристаллической решетки $3R$, чего на опыте никогда не наблюдается. Лишь очень малая часть электронов вблизи поверхности Ферми способна возбуждаться при нагревании, и их теплоемкость обычно составляет только проценты от теплоемкости решетки.

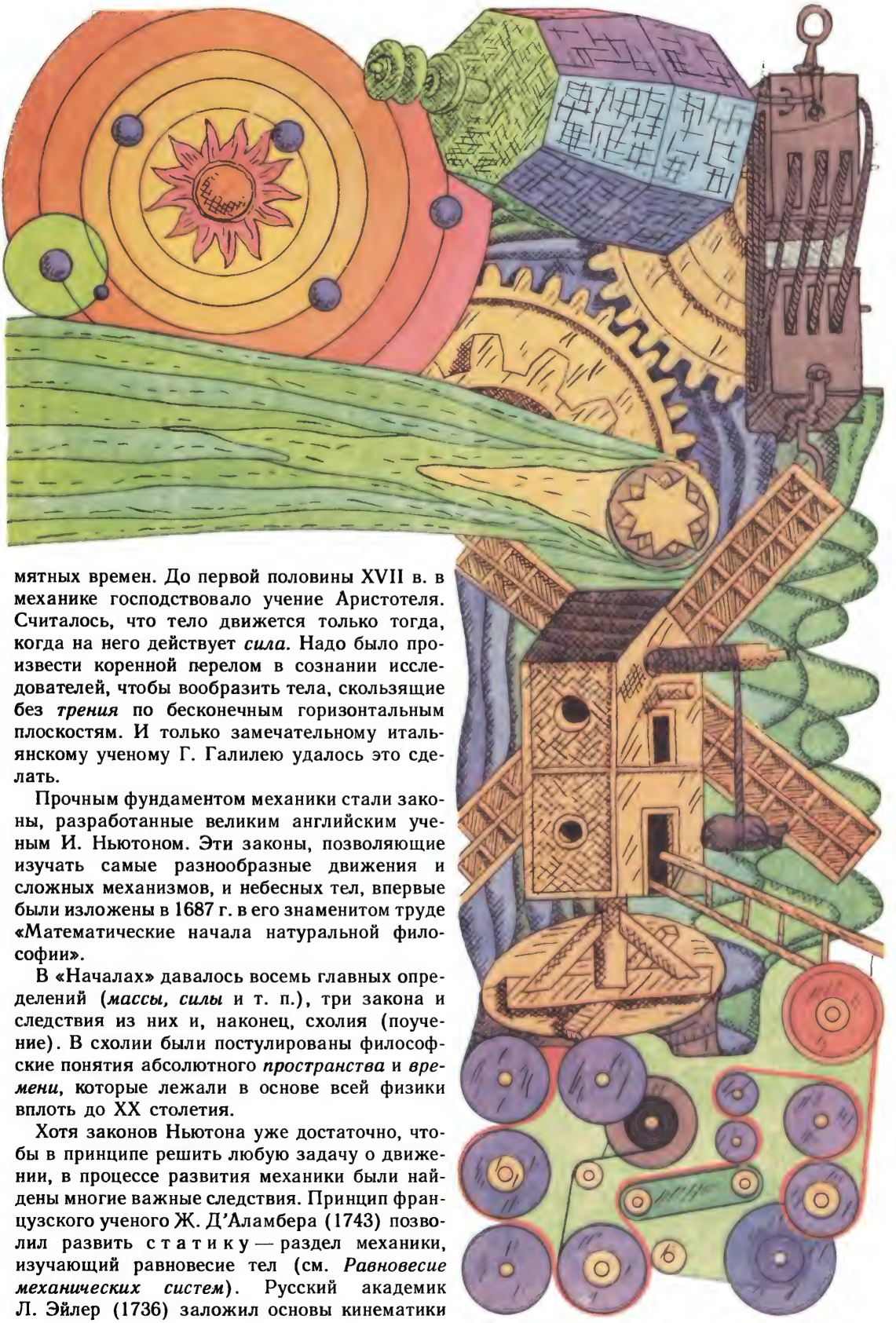
Тепловые колебания ионов (см. *Фонон*), примеси и дефекты нарушают регулярность в расположении ионов и препятствуют свободному движению электронов в металле. При понижении температуры сопротивление металлов обычно уменьшается, а при *низких температурах* оно становится постоянным и определяется рассеянием электронов на примесях и дефектах.

Любопытно, что если сильно «испортить» металл, загрязнить его примесями, то при охлаждении он может стать диэлектриком: электроны локализуются вблизи примесей, и проводимость при абсолютном нуле оказывается равной нулю (а сопротивление бесконечным). Такой эффект особенно сильный в тонких пленках или проволочках. Существует комбинация мировых постоянных: $R_0 = h/e^2 = 26$ кОм, которая имеет размерность сопротивления и определяет необходимую степень загрязнения металла. Образцы, имеющие сопротивление большее, чем R_0, при охлаждении должны становиться диэлектриками. Правда, температура перехода в диэлектрическое состояние сильно зависит от размера образца (толщины пленки или диаметра проволоки). Наблюдать этот эффект удалось только на очень тонких металлических проволоках и пленках.

МЕХАНИКА

Наука о *движении* и равновесии тел — механика — занимает центральное место в физической картине мира. Как и почему движутся тела — этот вопрос волновал людей с незапа-

Создавая многочисленные механизмы и сооружая всевозможные конструкции, человек опирается на законы физики и прежде всего на законы механики. Издавна люди интересовались тем, как и почему осуществляются движение и равновесие окружающих тел. В процессе исследования этих вопросов возникла и развилась механика. Она по праву зани-



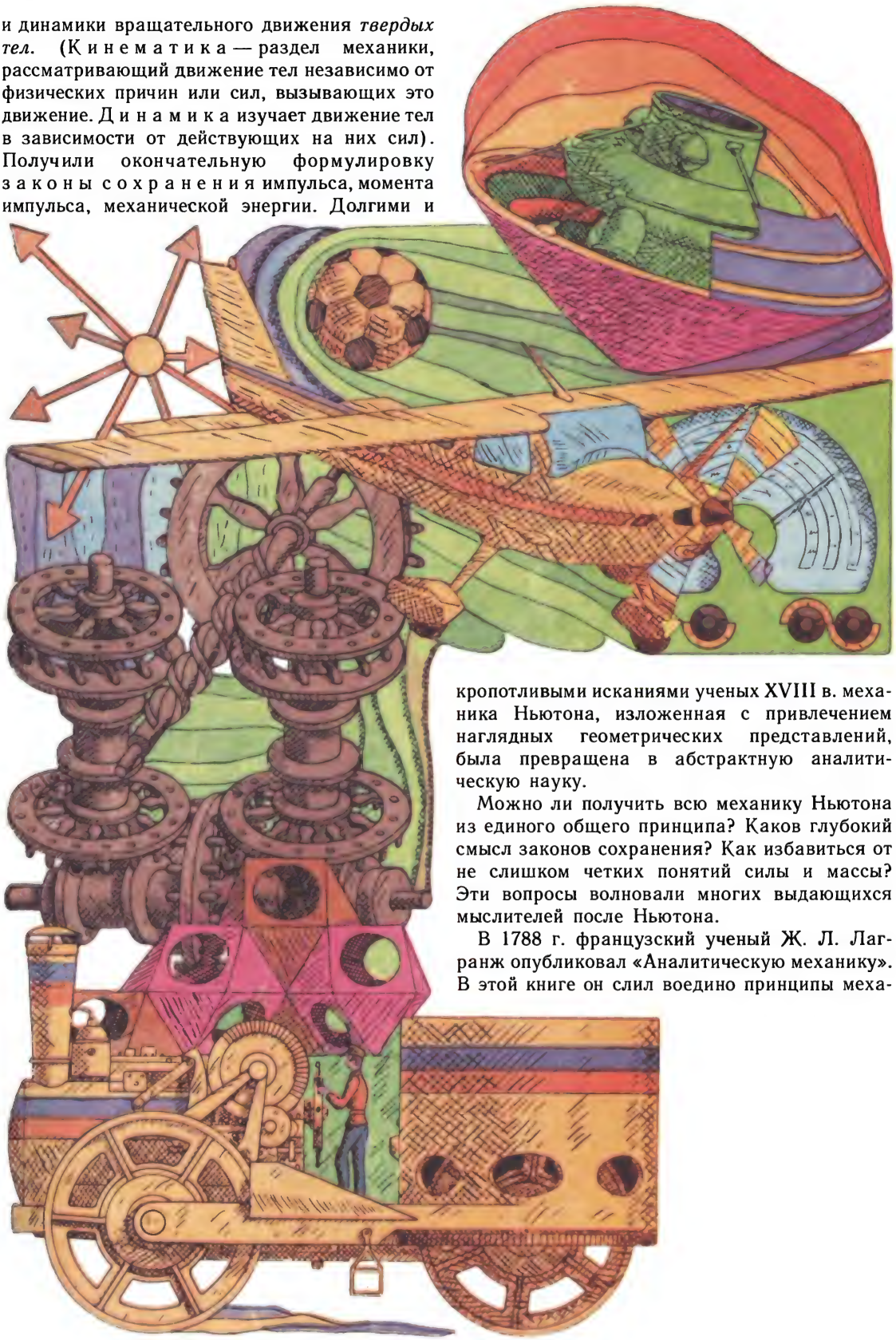
мятных времен. До первой половины XVII в. в механике господствовало учение Аристотеля. Считалось, что тело движется только тогда, когда на него действует *сила*. Надо было произвести коренной перелом в сознании исследователей, чтобы вообразить тела, скользящие без *трения* по бесконечным горизонтальным плоскостям. И только замечательному итальянскому ученому Г. Галилею удалось это сделать.

Прочным фундаментом механики стали законы, разработанные великим английским ученым И. Ньютоном. Эти законы, позволяющие изучать самые разнообразные движения и сложных механизмов, и небесных тел, впервые были изложены в 1687 г. в его знаменитом труде «Математические начала натуральной философии».

В «Началах» давалось восемь главных определений (*массы, силы* и т. п.), три закона и следствия из них и, наконец, схолия (поучение). В схолии были постулированы философские понятия абсолютного *пространства* и *времени*, которые лежали в основе всей физики вплоть до XX столетия.

Хотя законов Ньютона уже достаточно, чтобы в принципе решить любую задачу о движении, в процессе развития механики были найдены многие важные следствия. Принцип французского ученого Ж. Д'Аламбера (1743) позволил развить статику — раздел механики, изучающий равновесие тел (см. *Равновесие механических систем*). Русский академик Л. Эйлер (1736) заложил основы кинематики

мает центральное место в физической картине мира. Законы механики объясняют движение не только земных объектов, но также и небесных тел.

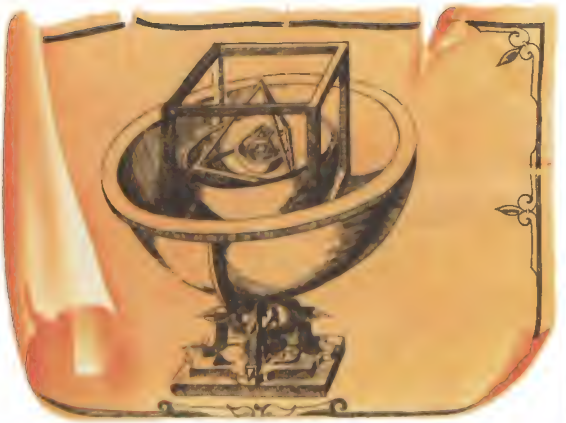


и динамики вращательного движения *твердых тел*. (Кинематика — раздел механики, рассматривающий движение тел независимо от физических причин или сил, вызывающих это движение. Динамика изучает движение тел в зависимости от действующих на них сил). Получили окончательную формулировку законы сохранения импульса, момента импульса, механической энергии. Долгими и кропотливыми исканиями ученых XVIII в. механика Ньютона, изложенная с привлечением наглядных геометрических представлений, была превращена в абстрактную аналитическую науку.

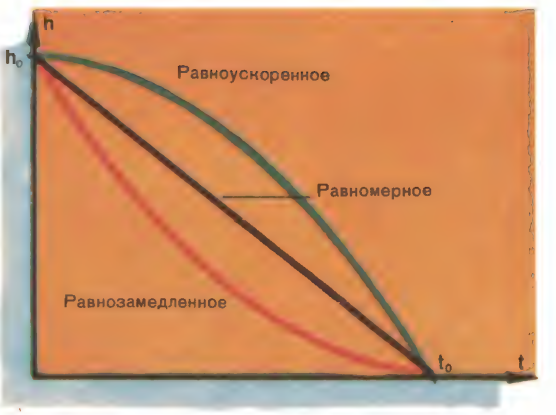
Можно ли получить всю механику Ньютона из единого общего принципа? Каков глубокий смысл законов сохранения? Как избавиться от не слишком четких понятий силы и массы? Эти вопросы волновали многих выдающихся мыслителей после Ньютона.

В 1788 г. французский ученый Ж. Л. Лагранж опубликовал «Аналитическую механику». В этой книге он слил воедино принципы меха-

Модель Вселенной из книги И. Кеплера «Тайна Вселенной» (1596) Орбиты планет вписаны в правильные многогранники



Зависимость высоты от времени для различных законов движения.



ники и дал общий метод решения задач по механике.

Принцип, который может быть положен в основу всей механики, — это принцип наименьшего действия (см. *Вариационные принципы*). Попробуем понять, в чем он состоит. Пусть, например, тело свободно падает в поле тяжести Земли. Из законов Ньютона известно, что такое тело движется с ускорением свободного падения $\vec{g}$.

Но забудем на время об этих законах. Тогда в принципе можно представить себе, что тело из начального положения в конечное движется или равноускоренно, или равномерно, или равнозамедленно, или вообще каким угодно способом, даже если время движения фиксировано (на рис. показаны соответствующие графики движения). Как же, не пользуясь законами Ньютона, можно узнать истинный закон движения?

ХРИСТИАН ГЮЙГЕНС (1629 — 1695)

Нидерландский физик, механик и математик Христиан Гюйгенс родился в Гааге. Учился в университетах Лейдена и Бреды, где изучал юридические науки и математику. В 22 года он напечатал свою первую научную работу об определении длины дуг окружности, эллипса и гиперболы.

Вскоре Гюйгенс заинтересовался физическими проблемами. Вместе с Р. Гуком он установил постоянные точки термометра — точку таяния льда и точку кипения воды. В эти же годы он работал над усовершенствованием объективов астрономических труб, увеличивая их светосилу. С их помощью Гюйгенс в 1655 г. открыл один из спутников Сатурна — Титан и определил период его обращения, установил наличие у Сатурна ныне всем известных колец.

В своей работе «Маятниковые часы» (1658) он исследовал ряд проблем, связанных с движением маятника.

Труды по математике, *механике* и астрономии создали Гюйгенсу широкую известность. В 1663 г. он становится первым иностранным членом Лондонского королевского общества (академии наук Англии). В 1665 г., при организации Французской академии наук, Гюйгенса приглашают в Париж в качестве ее председателя. Во Франции он прожил 16 лет.

По возвращении на родину в 1681 г. Гюйгенс занялся *оптикой*. Он сконструировал окуляр, который применяется до сих пор. Свои работы по оптике Гюйгенс завершил «Трактатом о свете» (1690), в котором впервые изложил волновую теорию света. В одной из глав трактата он дал объяснение явления двойного лучепреломления, открытого в кристаллах исландского шпата. Классическая теория преломления в оптически одноосных кристаллах и сегодня излагается на основе учения Гюйгенса.

К «Трактату о свете» было добавлено приложение «О причинах тяжести». В нем ученый приблизился к открытию закона всемирного тяготения.

Многие важные работы Гюйгенса увидели свет уже после смерти автора. К их числу относятся, например, трактаты «О движении тел под действием удара», «Диоптрика» и др.

Лагранж предлагает следующее. Давайте подсчитаем, как зависит от времени разность кинетической и *потенциальной энергии* тела (эту величину называют функцией Лагранжа L).

Затем найдем интеграл:

$$S = \int_0 L(t)dt,$$

который называют действием. Естественно, что для различных мыслимых законов движения получаются разные значения действия. В рассматриваемом нами случае свободному падению с ускорением g соответствует наименьшее значение действия.

Это утверждение имеет самый общий характер. Можно вообразить, что тело движется между начальным и конечным положениями за время движения t_0 по самым разным законам. Но истинным законом движения будет тот, которому соответствует минимальное значение действия. В этом и состоит принцип наименьшего действия.

Может показаться, что способ Лагранжа гораздо более сложный и искусственный, чем Ньютона. В рассмотренном простейшем случае это, действительно, так. Но принцип наименьшего действия оказался очень плодотворным при исследовании общих вопросов механики. Стала ясной глубокая связь законов сохранения с симметрией пространства и времени (см. *Симметрия законов природы*). Удалось вывести уравнения, упрощающие решение задач о движении сложных механических систем (уравнения Лагранжа) и т. д.

Была создана небесная механика, позволяющая с огромной точностью рассчитать движе-

ИСААК НЬЮТОН (1643 — 1727)

Выдающийся английский физик и математик, основатель классической *механики* Исаак Ньютон родился в семье небогатого фермера в местечке Вулсторп, около города Грантема. В 12 лет он начал учиться в Грантемской школе. В 1661 г. Ньютон поступил в один из колледжей Кембриджского университета и по окончании его получил ученую степень бакалавра.

Исключительную роль в жизни Ньютона сыграли 1665—1667 гг., которые он провел в родном Вулсторпе, укрываясь от эпидемии чумы. Здесь у него в основном сложились те идеи, которые привели ученого к важным открытиям: созданию математической основы физики — дифференциального и интегрального исчислений, открытию закона всемирного *тяготения*, к изобретению зеркального телескопа; здесь он провел опыты по разложению света (см. *Дисперсия*).

В 1668 г. Ньютону была присвоена степень магистра, и затем он возглавил физико-математическую кафедру в Кембриджском университете. В 1672 г. он был избран членом Лондонского королевского общества, а в 1703 г. стал его президентом.

Открытый им закон всемирного тяготения Ньютон успешно применил к объяснению движения небесных тел. Согласно этому закону все материальные тела притягиваются друг к другу, при этом величина силы тяготения не зависит от физических и химических свойств тел, от состояния их движения, от среды, в которой находятся тела. Тяготение на Земле проявляется в существовании силы тяжести, возникающей благодаря притяжению всякого материального тела Землей (см. *Тяготение*)

Основные вопросы механики и физики, которые разрабатывал Ньютон, были тесно связаны с научными проблемами его времени. Так, исследования в области *оптики* направлялись на устранение недостатков оптических приборов. В первой оптической работе «Новая теория света и цветов» (1672) Ньютон изложил свои взгляды о корпускулярной гипотезе света. Эта работа вызвала бурную полемику. Противником корпускулярных представлений Ньютона о природе света выступил английский ученый Р. Гук. Тогда Ньютон высказал гипотезу, сочетавшую корпускулярные и волновые представления о свете. Свои многолетние оптические исследования он опубликовал в 1704 г. в книге «Оптика», в которой нарисовал стройную картину различных оптических явлений, известных науке того времени.

Вершиной научных изысканий Ньютона стал его труд «Математические начала натуральной философии» (кратко — «Начала», 1687). В нем ученый создал единую систему земной и небесной механики, которая легла в основу всей классической физики. В этом научном труде Ньютон дал определения исходных понятий физики — количества материи, эквивалентного массе, плотности; количества движения, эквивалентного импульсу; различных видов силы и др.

Научная универсальность взглядов Ньютона оказала огромное влияние на дальнейшее развитие физики.

ние планет. Одним из основателей небесной механики был немецкий астроном И. Кеплер, сформулировавший в начале XVII в. основные законы движения планет.

Классическая механика просуществовала в неизменном виде до начала нашего века.

Революционные открытия *теории относительности* и *квантовой механики* существенно изменили наши представления о движении. Оказалось, что *длина* и *время* могут сокращаться, *масса* зависит от скорости, об *электроне* вообще нельзя говорить, по какой траектории он движется. Но все это происходит в мире больших скоростей и малых масс, а в нашем, «земном мире» движение по-прежнему подчиняется законам классической механики.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Почти все окружающие нас предметы несут механическую нагрузку — стул, на котором мы сидим, стол, на который облокотились, гвоздь, которым прибита к стене книжная полка, сама стена, весь каркас нашего дома, его фундамент и участок земли, на котором он стоит. Это все — нагрузки, действующие постоянно или прикладываемые медленно.

Если же взять двигатель автомобиля, то, как известно, на поршень действует взрывная сила давления со стороны газов, с огромной скоростью сгорающих в цилиндре. Поршень через шатун передает нагрузку на коленчатый вал, который, таким образом, оказывается под действием циклически изменяющихся сил.

В современной технике основные конструкционные материалы — *металлы* и сплавы. Более 90% от общего количества производимого человеком металла используется именно потому, что металлы обладают особым сочетанием механических свойств — хорошо сопротивляются нагрузкам. Лишь остальная, малая часть металлов находит применение в силу их высокой электропроводности, теплопроводности, магнитных свойств и др.

Рис. 1. Схема испытания на растяжение.

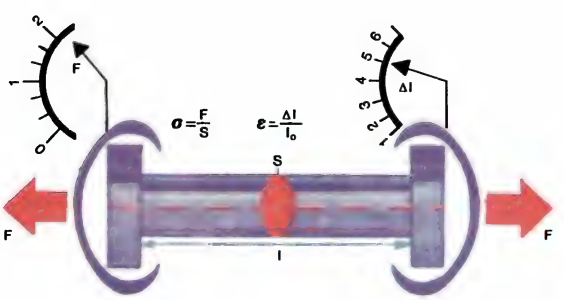
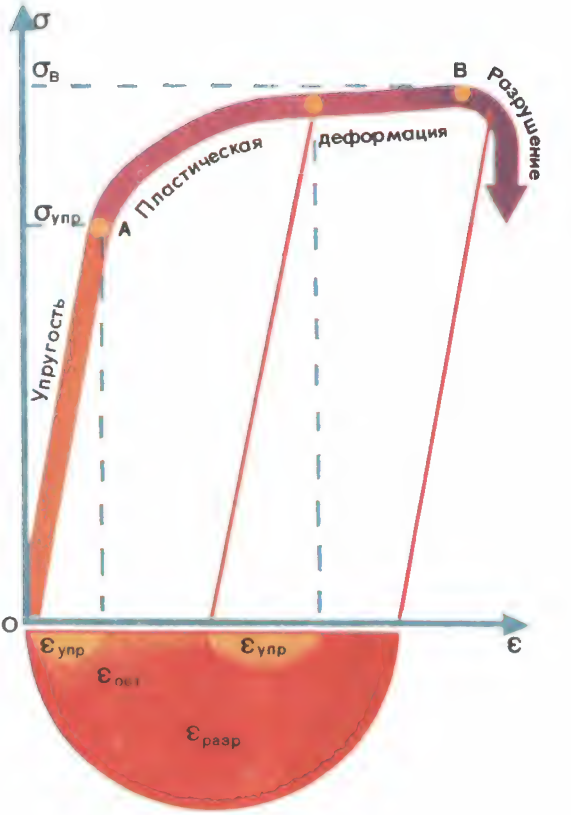


Рис. 2. Диаграмма деформации материала.



Под действием нагрузки материалы деформируются — изменяются размеры и формы деталей. Наука о механических свойствах устанавливает связь между напряжением σ и деформацией ε.

Напряжение равно отношению величины приложенной силы F к площади S поперечного сечения изделия: $\sigma = F/S$. Толстый канат может выдержать вес лифта с пассажирами, а тонкую проволочку из того же материала можно порвать руками; чтобы охарактеризовать свойства самого материала, нужно указать напряжение, которое его разрывает, и эта характеристика уже не будет зависеть от толщины изделия. Размерность напряжения — Н/м^2 (Па — паскали). Деформация ε — это безразмерная величина, равная отношению изменения размера изделия Δl к исходному размеру l_0: $\varepsilon = \Delta l / l_0$. Длинный стержень и короткая проволока из одного материала порвутся при равных ε.

Связь между σ и ε определяют путем испытания образцов с помощью специальных машин. Самый распространенный метод механических испытаний — испытание на растяжение, когда образцы с головками (рис. 1) зажимают в захватах машины и растягивают с нарастающей нагрузкой до разрыва. Приборы записывают изменение длины образца при каждом

Рис. 3. Пластину из материала, имеющего деформацию разрыва, равную 50%, можно сплющить до соприкосновения ее сторон.

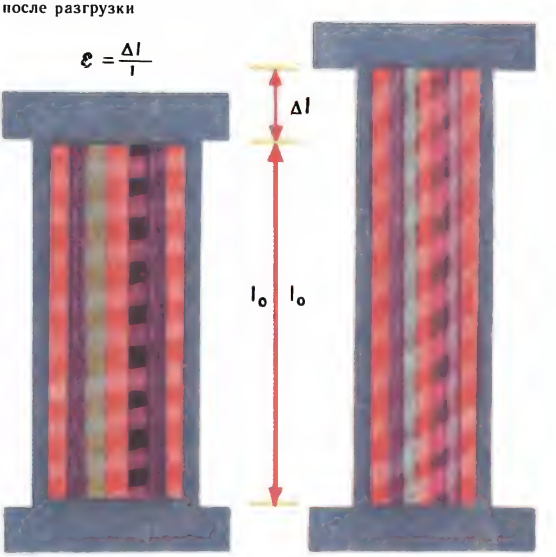
значении нагрузки, а затем, определив напряжение и удлинение, можно построить диаграмму деформации (рис. 2).

Важнейшие механические свойства материалов — их прочностные характеристики, упругость и пластичность.

На первом участке диаграммы металл деформируется упруго. Напряжение, соответствующее концу этого участка, $\sigma_{упр}$ называется пределом упругости. Если напряжение не превышало $\sigma_{упр}$, то линия разгрузки следует прямой AO, и исходные размеры изделия восстанавливаются. Линейная связь между σ и ε в пределах упругой области ($\sigma = E\varepsilon$) установлена английским естествоиспытателем Р. Гуком еще в XVII в. Константу E называют модулем упругости. Для многих металлов E имеет порядок $10^4 \div 10^5$ МПа, а $\sigma_{упр}$ — порядок $10 \div 10^2$ МПа, поэтому $\varepsilon_{упр}$ — это обычно десятые доли процента. Есть, правда, особые сплавы, которые выдерживают огромные упругие деформации — на два порядка больше, чем обычные металлы. Это явление называют сверхупругостью, а поведение таких сплавов при нагружении и разгрузке напоминает поведение резины.

У всех других материалов, если напряжение превысило $\sigma_{упр}$, начинается пластическая деформация. Линия разгрузки на рис. 2, согласно закону Гука, идет параллельно

Рис 4. Сохранение деформации после разгрузки



AO, и упругая деформация исчезает, но уже появляются остаточные изменения размеров ($\varepsilon_{ост}$). В технике остаточные деформации деталей чаще всего недопустимы, поэтому $\sigma_{упр}$ — это одна из основных прочностных характеристик. Другая основная характеристика прочности — $\sigma_в$ — предел прочности (или временное сопротивление); это наибольшее напряжение, которое может выдержать материал. Если напряжение превысит $\sigma_в$, материал разрушается. У лучших сортов стали $\sigma_{упр}$ превышает 10^3 МПа, $\sigma_в$ — $3 \cdot 10^3$ МПа.

Предельная деформация $\varepsilon_{разр}$, которую материал может выдержать без разрушения, определяется его пластичностью. Чем больше пластичность материала, тем легче придать ему сложную форму на стадии изготовления деталей. Если $\varepsilon_{разр} = 10\%$, то пластичность считается уже довольно высокой, а пластину из материала, имеющего $\varepsilon_{разр} = 50\%$, можно согнуть и сплющить до соприкосновения ее сторон (рис. 3).

ОПЫТ Н. А. УМОВА

Прогиб балки под действием поперечной силы очень сильно зависит от формы сечения балки. Для демонстрации этого известный русский физик Н. А. Умов показывал на лекции опыты, которые вы легко можете воспроизвести. Возьмите четыре полосы тонкого картона длиной около 20 см и шириной 5—6 см. Положите одну из них между двумя стопками книг, обвяжите в центре ниткой и подвесьте к ней гирьки или другие грузы известного веса (например, монеты в мешочке). Под действием самого малого груза полоса прогнется. Теперь будем менять форму сечения нашей балки. Вторую полоску согнем углом, третью — в виде тавра (буквой П) и повторим испытания.

Фигурные полоски выдерживают значительно больший груз. Однако «чемпионом» станет полоса, которую мы свернем в трубку и свяжем ниткой. Она прогибается под действием груза, в сотни раз большего, чем плоская пластина. Например, трубка с внешним радиусом $R = 1{,}2$ см и внутренним $r = 0{,}75$ см прогибается так же, как сплошной брусок квадратного сечения со стороной $a = 2$ см. А ведь количество материала, пошедшее на такую трубку, в 1,5 раза меньше, чем на брусок той же длины.

Полые кости животных и птиц говорят о том, что природа хорошо использует прочные и легкие трубки.

Пластическая деформация происходит путем взаимных сдвигов соседних слоев материала, причем эти сдвиги имеют необратимый характер, т. е. деформация сохраняется после разгрузки (рис. 4). Теперь есть только один способ вернуть материал к исходной форме — пластически деформировать его в противоположном направлении. Однако те же сплавы, которые проявляют сверхупругость, можно обработать так, что они будут «запоминать» форму. Пластическая деформация таких сплавов (если она не превышает примерно 10%) исчезает при нагревании без всякого участия внешних сил — восстанавливается прежняя форма изделия.

Пластические деформации (сдвиги) связаны с движением дефектов кристаллической решетки (см. *Дислокации*). Выращенные особым способом, очень тонкие кристаллы («усы») имеют почти идеальное кристаллическое строение и практически не содержат дислокаций. Они не способны к пластической деформации, а их прочность бывает в 100 раз выше, чем у самой прочной стали. С другой стороны, имеется возможность многие сплавы привести в так называемое сверхпластичное состояние, когда они при очень низких напряжениях текут, подобно разогретому стеклу. В этом случае $\varepsilon_{разр}$ составляет тысячи процентов — из металла можно изготовить такие же ажурные изделия, какие делают стеклодувы.

Когда дислокации в материале не могут легко двигаться, он становится хрупким и разрушается без заметной остаточной деформации. Чем больше пластичность, тем более надежен материал в эксплуатации, тем меньше опасность неожиданных хрупких разрушений, имеющих часто катастрофические последствия. Так разрушаются иногда корпуса кораблей, самолетов и ракет. Это происходит в результате роста трещин, которые могут за несколько секунд пробежать десятки километров.

Как видно, механические свойства материалов изменяются в очень широких пределах. Даже у одного и того же сплава в зависимости от способа его обработки и ряда других условий (температуры, скорости приложения нагрузки) прочность и пластичность различаются на несколько порядков. Если же взять всю совокупность конструкционных материалов — металлических и неметаллических, то вместе они охватывают огромный диапазон механических характеристик. В связи с этим одно из современных направлений в материаловедении — создание искусственных композиций из разнородных материалов. Распространенный вид композиционных материалов — это легкая и пластичная основа (например, смола), в которой размещены тонкие волокна очень прочного вещества («усы»). Такой «сборный» материал как бы суммирует преимущества каждого из компонентов, а их недостатки сглаживает

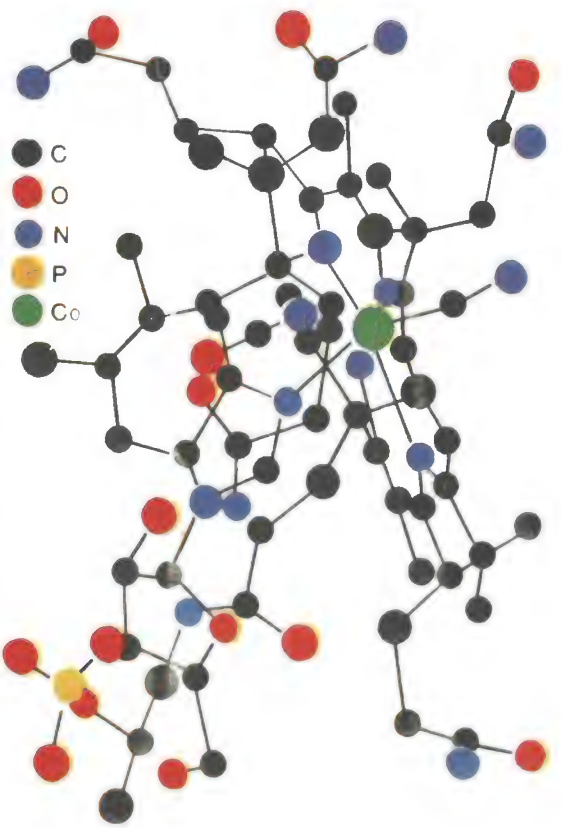
МОЛЕКУЛА

Молекула в современном понимании — это наименьшая частица вещества, обладающая всеми его химическими свойствами. Молекула способна к самостоятельному существованию. Она может состоять как из одинаковых *атомов*, например кислород O_2, озон O_3, азот N_2, фосфор P_4, сера S_6 и т. д., так и из различных атомов: сюда относятся молекулы всех сложных веществ. Простейшие молекулы состоят из одного атома: это молекулы инертных газов — гелия, неона, аргона, криптона, ксенона, радона. В так называемых высокомолекулярных соединениях и полимерах каждая молекула может состоять из сотен тысяч атомов.

Экспериментальное доказательство существования молекул первым наиболее убедительно дал французский физик Ж. Перрен в 1906 г. при изучении *броуновского движения*. Оно, как показал Перрен, является результатом теплового движения молекул — и ничем иным.

Сущность молекулы можно описать и с другой точки зрения: молекула — устойчивая система, состоящая из *ядер* атомов (одинаковых или различных) и окружающих *электро-*

Простейшая модель молекулы витамина B_{12}.



нов, причем химические свойства молекулы определяются электронами внешних оболочек в атомах. Атомы объединяются в молекулы в большинстве случаев химическими связями. Обычно такая связь создается одной, двумя или тремя парами электронов, которыми владеют сообща два атома.

Атомы в молекулах соединены друг с другом в определенной последовательности и определенным образом распределены в пространстве. Связи между атомами имеют различную прочность; она оценивается величиной энергии, которую необходимо затратить для разрыва межатомных связей.

Эта величина сильно различается для различных связей, но не превышает нескольких десятков ккал/моль.

Молекулы характеризуются определенными размером и формой. Если известны молекулярный вес и плотность данного вещества, то вычислить размер его молекул несложно. Для этого надо объем, занимаемый грамм-молекулой вещества, разделить на число Авогадро ($6{,}02 \cdot 10^{23}$) (см. *Авогадро закон и число*). Корень кубический из полученного значения и даст нам величину диаметра молекулы. Но этот расчетный метод применим далеко не во всех случаях; для определения геометрических размеров молекул большинства веществ используют различные экспериментальные методы измерения. Форма молекулы определяется длинами связей между атомами и углами между связями. Так, в молекуле воды длина связи O—H примерно равна 0,96 Å, а угол между двумя этими связями составляет 104°27′. В свою очередь, длины связей и углы зависят от строения электронных оболочек атомов и их взаимного влияния друг на друга. Молекулы могут иметь форму треугольника, пирамиды, тетраэдра и других геометрических фигур. Но широко распространены и вещества, в молекулах которых атомы расположены линейно. Строение молекул изучается с помощью рентгено-, электроно- и нейтронографии, молекулярной спектроскопии и других методов.

В газообразном состоянии вещества, как правило, при обычных температурах состоят из молекул; при более или менее сильном нагревании происходит их термическая диссоциация на атомы. Присутствие молекул характерно для большинства *жидкостей* и так называемых молекулярных кристаллов (см. *Кристаллофизика*). Для всех упомянутых веществ химические формулы непосредственно выражают количественный и качественный состав молекул. С современной точки зрения в таких веществах, как *металлы*, сплавы, а также в ионных и атомных кристаллах, молекул, как таковых, обычно не существует. Это объясняется тем, что в таких веществах каждый атом (ион) со всеми соседними атомами (ионами) взаимодействует примерно в одинаковой степени.

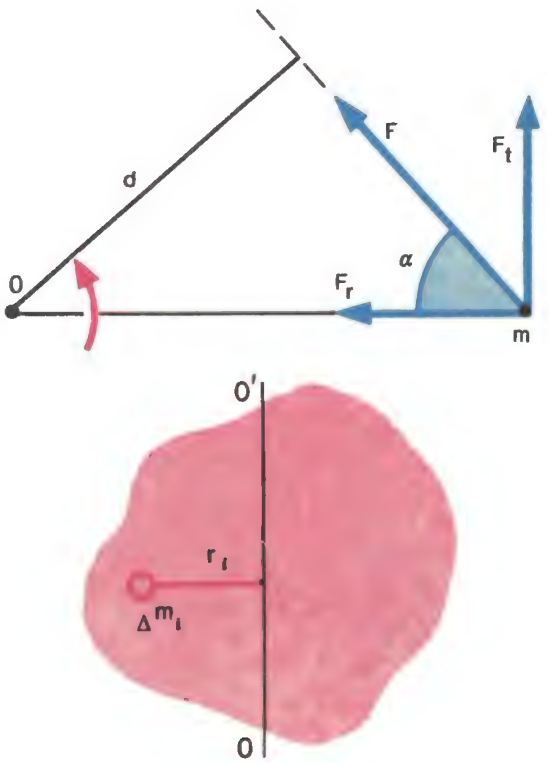
МОМЕНТ ИНЕРЦИИ

Кто из нас не следил с удивлением и восторгом за тем, как эффектно фигуристы заканчивают свои выступления на ледяной арене? Они начинают вращаться, зафиксировав центр вращения одним коньком и отталкиваясь другим, широко разведя руки в стороны, достигают достаточно большой угловой скорости вращения, а затем быстро прижимают руки к телу. После этого их угловая скорость вращения резко возрастает.

В чем же тут дело? Почему, лишь прижав руки к телу и не прикладывая больше никаких усилий, фигуристу удается резко увеличить угловую скорость своего вращения? Не опровергается ли этим *закон сохранения энергии*? Конечно, нет. Объяснение описанного явления дает один из разделов ньютоновской *механики* — динамика твердого тела. Под *твердым телом* при этом понимается система частиц, взаимные расстояния между которыми не изменяются.

Оказывается, несмотря на сложность задачи о вращательном движении твердого тела, ее можно свести к решению уравнений, по форме аналогичных уравнениям Ньютона для поступательного движения. Роль ускорения, *силы*

Момент инерции тела относительно некоторой оси вращения определяется суммой моментов инерции совокупности материальных точек



и *массы* в этом случае играют угловое ускорение, момент силы и момент инерции. С этими важными понятиями можно познакомиться на простом примере движения одной материальной точки A массой m, которая удерживается на окружности радиуса r с помощью невесомого стержня. Пусть на точку A действует постоянная сила $\vec{F}$. Если в данный момент она составляет угол α с радиус-вектором материальной точки A, то ее составляющая $F_r = F \cdot \cos\alpha$ просто сжимает стержень, а составляющая $F_t = F \cdot \sin\alpha$ приводит к появлению тангенциального ускорения a_t, изменяющего величину скорости частицы. (Это ускорение направлено по касательной к траектории частицы. Его следует отличать от центростремительного ускорения, которое всегда направлено к центру вращения и меняет лишь направление вектора скорости частицы.)

Согласно второму закону Ньютона, для тангенциального ускорения можно записать:

$$ma_t = F_t = F \cdot \sin\alpha. \quad (1)$$

По аналогии с угловой скоростью введем угловое ускорение $\varepsilon = \frac{a_t}{r}$. Оно характеризует скорость изменения угловой скорости ω со временем. Тогда равенство (1) будет иметь вид:

$$F \cdot \sin\alpha = m \cdot r \frac{a_t}{r} = m \cdot r \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Умножив обе части этого уравнения на радиус, получим:

$$F \cdot r \cdot \sin\alpha = mr^2\varepsilon, \quad (3)$$

или $M = J \cdot \varepsilon$.

Величина $M = F \cdot r \cdot \sin\alpha$, численно равная произведению силы F на длину перпендикуляра $d = r \cdot \sin\alpha$, опущенного на направление силы из центра вращения (плечо силы), называется моментом силы относительно точки O. Величину $J = mr^2$, равную произведению массы материальной точки A на квадрат

МАЯТНИК МАКСВЕЛЛА

Прибор, который мы рекомендуем вам сделать, носит имя известного английского физика — маятник Максвелла. Несложный в изготовлении, он часто демонстрируется на лекциях по *механике* и позволяет выявить ряд интересных закономерностей *движения твердого тела*.

Посмотрите на рисунок такого маятника. Это диск, насаженный на ось, к которой привязаны две нити. Их верхние концы закреплены на перекладине. Закрутите нити вокруг оси — диск поднимается. Теперь отпустите маятник — и он начнет совершать периодическое движение: сначала диск опускается, нить раскручивается, диск вращается все быстрее; дойдя до нижней точки и продолжая по инерции вращаться, диск меняет направление своего движения и поднимается вверх. Так он совершает колебания, пока не остановится.

Несколько советов по изготовлению маятника: диск должен быть тяжелым ($m > 100$ г), большим ($d > 5$ см), ось — тонкой и легкой, нити — прочными и достаточно длинными (0,5 м). Лучше иметь набор дисков, меняемых на оси.

Легко выяснить, что период колебания маятника, т. е. полное время спуска и подъема, не зависит от массы диска, а зависит от его радиуса, причем зависимость эта почти прямо пропорциональная. Это указывает на то, что для описания движения маятника необходимо использовать такое понятие, как момент инерции J (для диска $J = \frac{mr^2}{2}$)

Точная формула для периода маятника Максвелла может быть получена путем довольно простых выкладок (см., например, журнал «Квант», 1981, № 11).

$$T = 2\sqrt{\frac{2l}{g}\left(1 + \frac{J}{mr^2}\right)},$$

где l — длина нити, r — радиус оси диска, J — момент инерции.

Эту формулу можно применять как для диска, так и для шара, соответственно изменив конструкцию маятника.

Изменяя движением рук момент инерции тела, фигуристка управляет скоростью вращения.

ее расстояния до центра вращения, называют *моментом инерции* материальной точки относительно точки O.

В случае произвольного *твердого тела* момент инерции характеризуется распределением массы в этом теле и определяется суммой моментов инерции совокупности материальных точек, на которые можно разбить твердое тело:

$$J = \sum_{i=1}^{N} \Delta m_i r_i^2, \qquad (4)$$

где Δm_i — масса i-й точки, r_i — ее расстояние до оси вращения.

Момент инерции служит мерой инертности тела при вращении и, таким образом, играет ту же роль, что и масса в случае поступательного движения. Однако в отличие от массы тела, которая при обычных условиях остается неизменной, момент инерции можно легко менять. Действительно, даже в рассмотренном выше простейшем случае материальной точки на стержне момент инерции зависел не только от величины массы, но и от того, как далеко она расположена от оси вращения. Поэтому, перемещая материальную точку по стержню от центра вращения, можно увеличивать инерцию вращения такой системы.

В зависимости от формы и выбранной оси вращения твердые тела одной и той же массы могут иметь различные моменты инерции. Так, момент инерции полого цилиндра радиуса r относительно его оси симметрии равен mr^2; однородного шара, вращающегося относительно оси, проходящей через его центр,— $\frac{2}{5}mr^2$; однородного цилиндра, вращающегося относительно своей оси симметрии,— $\frac{1}{2}mr^2$.

И момент силы $\vec{M}$, и угловая скорость $\vec{\omega}$, и угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$, так же как и соответствующие им величины силы, скорости и ускорения при описании поступательного движения, являются векторами. Эти векторы направлены вдоль оси вращения (*аксиальные векторы*), причем их направление определяется по *правилу буравчика*, т. е. совпадает с направлением поступательного движения буравчика, рукоятка которого вращается в том же направлении, что и тело.

Можно ввести еще один важный вектор: $L = J \cdot \vec{\omega}$, называемый *моментом количества движения*. Являясь аналогом импульса для вращательного движения, он обладает замечательным свойством: момент количества движения замкнутой системы остается постоянным по величине и направлению. Изменяется он только под воздействием приложенных к рассматриваемой системе нескомпенсированных моментов внешних сил.

Вернемся снова к началу этой статьи, где рассказывалось о вращающемся фигуристе. Пренебрегая малыми моментами действующих на него сил сопротивления, можно считать, что он представляет собой замкнутую систему. Поэтому достигнутый им при начальном разгоне момент количества движения $J_1 \vec{\omega}_1$ должен сохраняться (ω_1 — его начальная угловая скорость, J_1 — момент инерции в положении с разведенными руками). Прижимая руки к телу, фигурист, очевидно, уменьшает свой момент инерции до некоторой величины J_2 и тем самым увеличивает свою угловую скорость: $\omega_2 = \frac{J_1}{J_2}$. Однако в этот момент ему приходится «поработать», так как начальная кинетическая энергия его вращения была $\frac{J_1 \omega_1^2}{2}$, а конечная — становится $\frac{J_2 \omega_2^2}{2}$. Разность этих энергий и составляет величину *работы* фигуриста.

МОЩНОСТЬ

Часто механизмы, созданные человеком для выполнения одной и той же работы, заметно отличаются по своим свойствам. Так, добротный лифт в старом доме поднимает вас на пятый этаж за минуту, в то время как современному скоростному лифту в высотном доме для этого потребуется всего несколько секунд. Работа обоих механизмов против силы тяжести, очевидно, одна и та же, однако произведена она за разное время. Для характеристики скорости выполнения механизмом работы введено понятие мощности.

Ту или иную работу можно совершить за разное время. Чем меньше время, тем выше мощность. В одном случае вы поднялись в свою квартиру не спеша, отдыхая на каждом этаже, а в другом случае поднялись быстро, взбегая по ступенькам. В обоих случаях вы совершили одну и ту же работу, но развили разную мощность

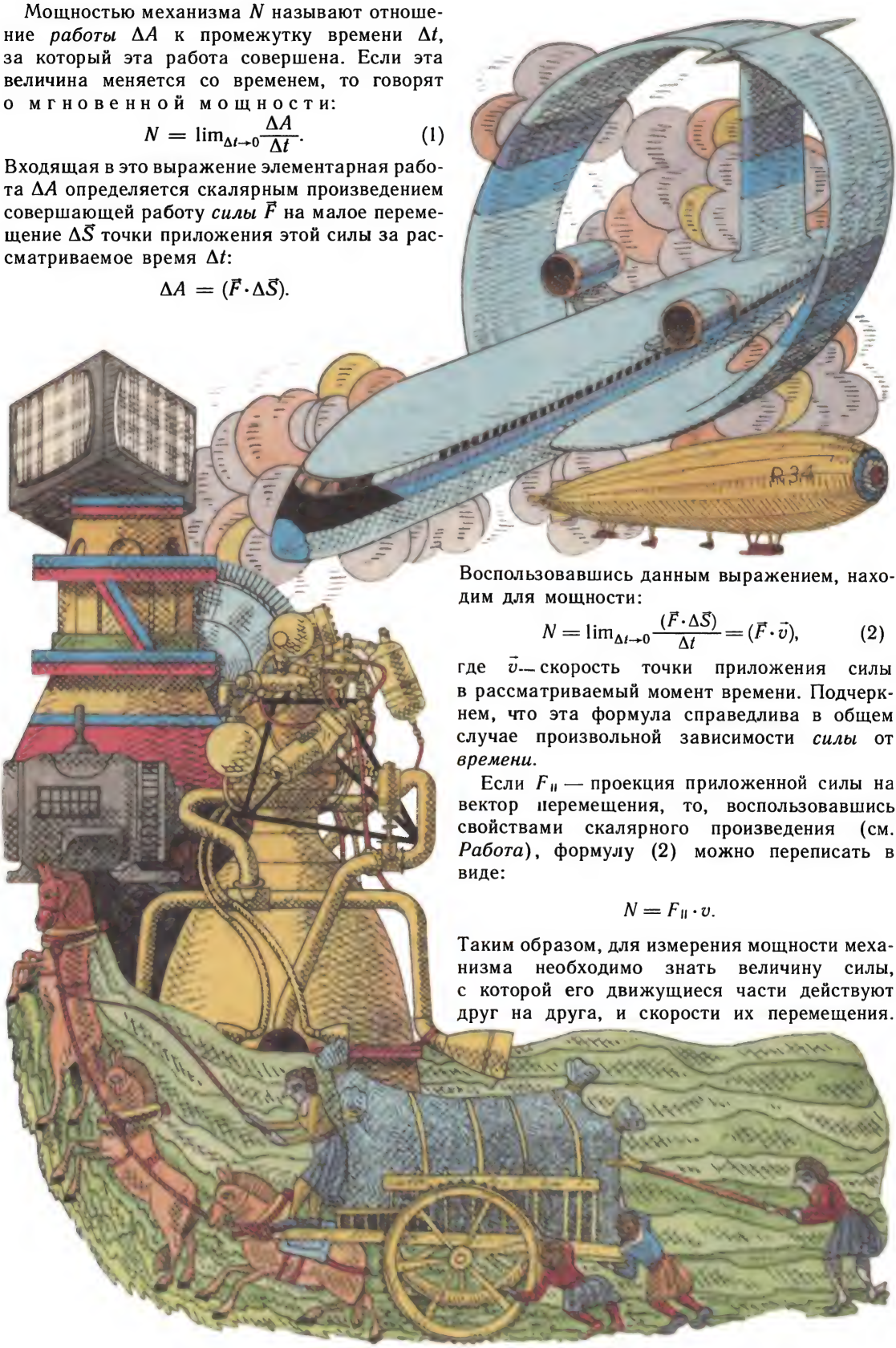
Мощность — важнейшая

Мощностью механизма N называют отношение *работы* ΔA к промежутку времени Δt, за который эта работа совершена. Если эта величина меняется со временем, то говорят о мгновенной мощности:

$$N = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Входящая в это выражение элементарная работа ΔA определяется скалярным произведением совершающей работу *силы* $\vec{F}$ на малое перемещение $\Delta\vec{S}$ точки приложения этой силы за рассматриваемое время Δt:

$$\Delta A = (\vec{F} \cdot \Delta\vec{S}).$$



Воспользовавшись данным выражением, находим для мощности:

$$N = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{(\vec{F} \cdot \Delta\vec{S})}{\Delta t} = (\vec{F} \cdot \vec{v}), \qquad (2)$$

где $\vec{v}$ — скорость точки приложения силы в рассматриваемый момент времени. Подчеркнем, что эта формула справедлива в общем случае произвольной зависимости *силы* от *времени*.

Если $F_{\parallel}$ — проекция приложенной силы на вектор перемещения, то, воспользовавшись свойствами скалярного произведения (см. *Работа*), формулу (2) можно переписать в виде:

$$N = F_{\parallel} \cdot v.$$

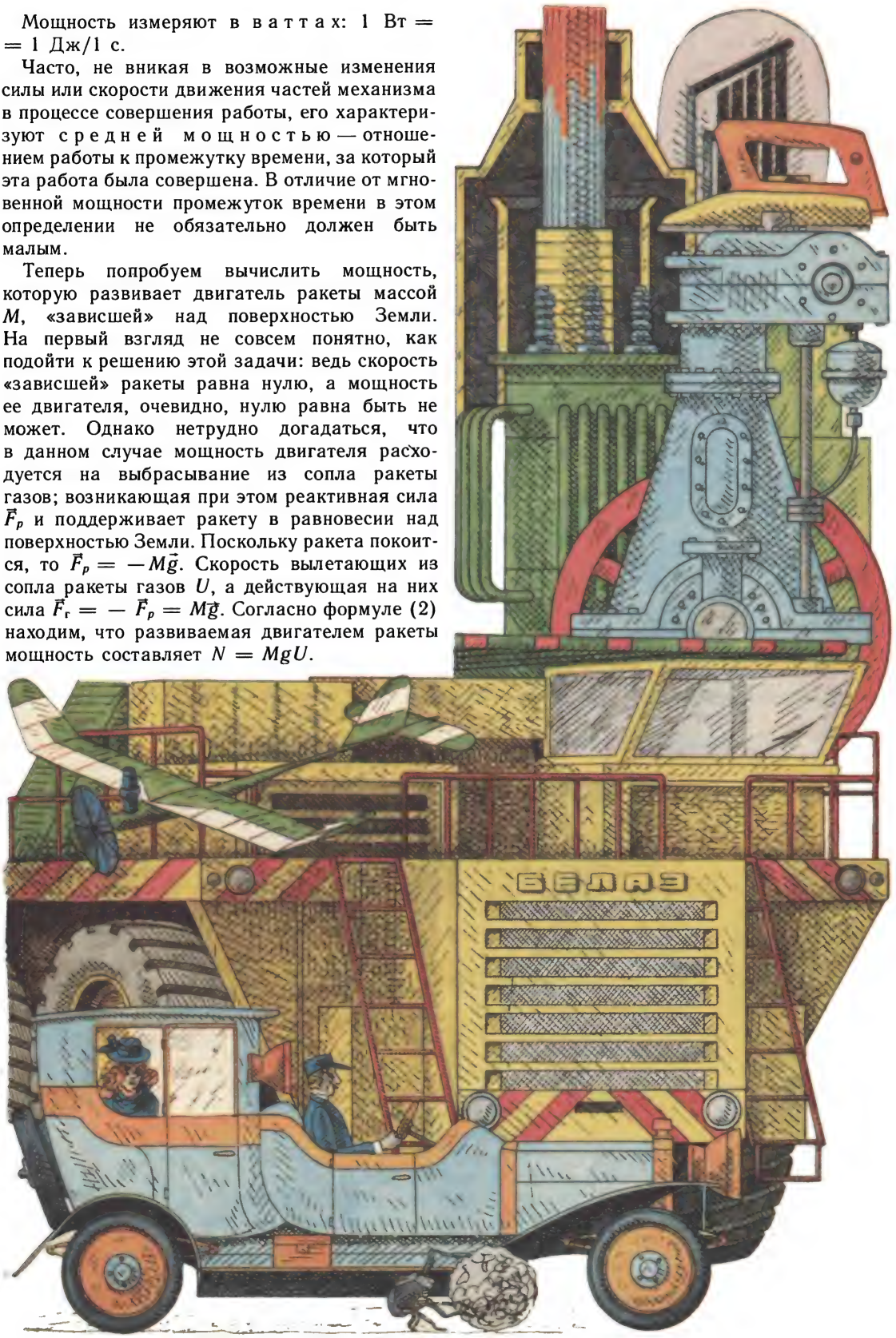
Таким образом, для измерения мощности механизма необходимо знать величину силы, с которой его движущиеся части действуют друг на друга, и скорости их перемещения.

характеристика всех двигателей Мощность БелАЗ во много раз больше мощности автомобилей первых образцов. Мощность реактивного лайнера значительно превышает мощность первых летательных аппаратов.

Мощность измеряют в ваттах: 1 Вт = = 1 Дж/1 с.

Часто, не вникая в возможные изменения силы или скорости движения частей механизма в процессе совершения работы, его характеризуют средней мощностью — отношением работы к промежутку времени, за который эта работа была совершена. В отличие от мгновенной мощности промежуток времени в этом определении не обязательно должен быть малым.

Теперь попробуем вычислить мощность, которую развивает двигатель ракеты массой M, «зависшей» над поверхностью Земли. На первый взгляд не совсем понятно, как подойти к решению этой задачи: ведь скорость «зависшей» ракеты равна нулю, а мощность ее двигателя, очевидно, нулю равна быть не может. Однако нетрудно догадаться, что в данном случае мощность двигателя расходуется на выбрасывание из сопла ракеты газов; возникающая при этом реактивная сила $\vec{F}_p$ и поддерживает ракету в равновесии над поверхностью Земли. Поскольку ракета покоится, то $\vec{F}_p = -M\vec{g}$. Скорость вылетающих из сопла ракеты газов U, а действующая на них сила $\vec{F}_г = -\vec{F}_p = M\vec{g}$. Согласно формуле (2) находим, что развиваемая двигателем ракеты мощность составляет $N = MgU$.



Н

НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ

Мы привыкли в быту к этому слову. Все знают: в комнатной розетке напряжение 220 В. А может быть, все-таки 311 В? Чтобы ответить на этот вопрос, определим понятие: напряжением между двумя точками электрической цепи называют работу по перемещению между ними единичного положительного заряда. В системе СИ за единицу напряжения принят вольт (1 В), названный так в честь итальянского ученого А. Вольта, изучавшего электричество в конце XVIII — начале XIX в. От величины напряжения зависит ток в цепи (см. *Электродинамика*) и энергия частицы, прошедшей путь между двумя электродами (рис. 1).

Возможность получения высоких напряжений ограничена электрической прочностью изоляторов, в том числе и воздуха. Максимальные значения напряжения, достижимые сегодня, исчисляются несколькими миллионами вольт. Минимальные напряжения, с которыми еще имеют дело в технике, составляют доли мкВ. Таким образом, диапазон напряжений охватывает более чем 12 порядков: от 10^{-6} до 10^{6} В.

Самые точные измерения напряжения производят с помощью потенциометра (рис. 2). В этом приборе измеряемую величину сравнивают с напряжением эталона — нормального элемента Вестона. Точность результата — пять-шесть знаков. Если требуется измерить напряжение в десятки и даже сотни тысяч вольт, то его величину находят по расстоянию между большими металлическими шарами, при котором происходит пробой в воздухе.

А как же обстоит дело с напряжением в бытовой сети? Его величина колеблется по синусоидальному закону. Поэтому приборы для его измерения проградуированы так, чтобы показывать среднеквадратичное, или действующее, значение напряжения: $U_g = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, где U_m — максимальное, или амплитудное, напряжение. Именно действующее напряжение входит в формулу для расчета мощности в цепях переменного тока: $P = \frac{U_g^2}{R}$ Вт (в СИ). Здесь R — сопротивление цепи. Итак, и 220 и 311 В — правильные цифры: вторая — это максимальное напряжение в нашей сети.

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Когда Н. Коперник заменил систему отсчета, связанную с Землей и принятую еще во II в. К. Птолемеем, на систему, связанную с Солнцем, и объяснил в ней движение планет, он произвел революцию в человеческом мышлении. Много веков, вплоть до XVI столетия, люди пользовались единственной, выделенной системой отсчета, хотя движение планет и

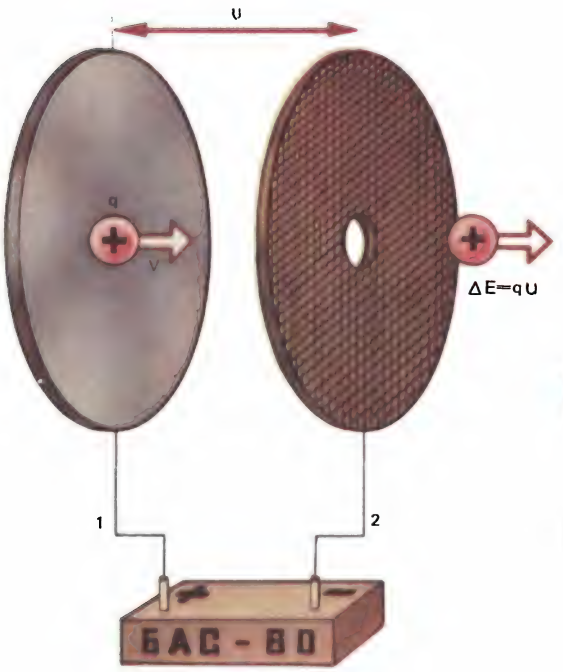
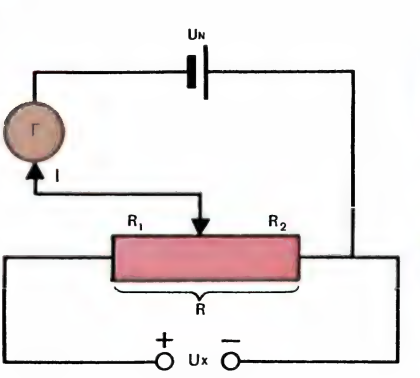


Рис. 1. Ускоряющий промежуток. Разность потенциалов между электродами *1* и *2* равна *U* Энергия заряженной частицы, прошедшей между электродами, $\Delta E = qU$, где q — заряд частицы.



а

б

Рис. 2. Измерение неизвестного напряжения (рис. а) сравнением его с напряжением нормального элемента (рис. б). Когда $I = 0$, $U_x = \frac{R}{R_1}U$.

АЛЕССАНДРО ВОЛЬТА (1745 — 1827)

Известный итальянский физик, чьим именем названа единица электрического напряжения, родился в небольшом городке Комо, близ Милана. В будущем ученом довольно рано проснулся интерес к изучению электрических явлений природы. В 1769 г. он публикует статью о лейденской банке, затем еще одну статью — об электрической машине. В 1774 г. он начинает преподавать физику в гимназии родного городка, а с 1779 г. становится профессором университета в Павии.

В числе его изобретений — электрофор, электрометр, электроскоп с конденсатором и другие приборы. В 1800 г. он изобрел первый источник электрического тока — Вольтов столб, состоявший из медных и цинковых пластинок, между которыми были проложены кружки материи, пропитанные раствором щелочи. Это изобретение принесло ученому всемирную славу.

Ряд интересных опытов Вольта провел по изучению «животного электричества».

«Что вы думаете о так называемом животном электричестве? — писал он в 1794 г. — Что касается меня, то я давно убежден, что все действие возникает первоначально вследствие прикосновения металлов к какому-нибудь влажному телу или к самой воде.

В силу такого соприкосновения электрический флюид гонится в это влажное тело или в воду от самих металлов, от одного больше, от другого меньше (больше всего от цинка, меньше всего от серебра). При установлении непрерывного сообщения между соответствующими проводниками этот флюид совершает постоянный кругооборот».

Таково первое описание замкнутой электрической цепи. Более того, в отличие от своего предшественника итальянского ученого Л. Гальвани (1737—1798), Вольта понял, что никакого особого «животного электричества» нет. Это то же электричество, что и в обычной электрической цепи. Если эту цепь разорвать и в место разрыва вставить в качестве соединительного звена жизнеспособный нерв лягушки, то «управляемые такими нервами мышцы... начинают сокращаться, как только замыкается цепь проводников и появляется электрический ток». Его работы в данной области исследований имели важное значение для развития физиологии.

Вольта открыл взаимную электризацию разнородных металлов при их контакте (контактная разность потенциалов) и расположил их по величине возникающего между ними напряжения в так называемый ряд напряжений.

ГЕОРГ СИМОН ОМ (1787 — 1854)

Немецкий физик. Родился в Германии в довольно бедной семье. Поэтому, начав в 1805 г. обучение в Эрлангенском университете, он не смог его закончить. Работал учителем в Готштадте (Швейцария). В 1811 г. подготовил и защитил в Эрлангене докторскую диссертацию. В течение 20 лет Ом преподавал в гимназиях Бамберга, Кёльна, Берлина. Научными исследованиями ему удавалось заниматься лишь в свободное от преподавания время. В 1833 г. он стал директором Политехнической школы в Нюрнберге, а в 1849 г. — профессором Мюнхенского университета.

В 1826 г. Ом открыл свой основной закон электрической цепи. Закон Ома устанавливает, что сила постоянного электрического тока I в проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) U между двумя его сечениями: $RI = U$. Коэффициент пропорциональности R называют сопротивлением проводника. Этот закон не сразу нашел признание в науке, а лишь после того, как Э. Х. Ленц, Б. С. Якоби, К. Гаусс, Г. Кирхгоф и другие ученые положили его в основу своих исследований. В 1881 г. на Международном конгрессе электриков именем Ома была названа единица электрического сопротивления (Ом).

Последние годы своей жизни Ом посвятил исследованиям в области *акустики*. В 1843 г. он показал, что простейшее слуховое ощущение вызывается гармоническими колебаниями, на которые ухо разлагает сложные звуки. Акустический закон Ома был положен затем немецким ученым Г. Гельмгольцем в основу резонансной теории слуха.

Ом вел также исследования и в области *оптики* и кристаллооптики.

В 1842 г. он был избран членом Лондонского королевского общества.

Силы инерции в лифте, движущемся с ускорением.

Солнца в ней описывалось очень сложным образом. Несколько позже из трудов Г. Галилея и И. Ньютона стало ясно, что для описания движения столь же пригодны и все другие системы отсчета, движущиеся равномерно и прямолинейно по отношению к системе неподвижных звезд. Так были открыты инерциальные системы (см. *Инерция*), в которых движением тел управляют законы классической механики И. Ньютона.

Ну, а что было дальше с системой отсчета, связанной с Землей? Ведь Земля для нас, живущих на ней, все-таки выделенная система. Исследуя движение тел, чаще всего вообще можно забыть о Солнце и звездах. Строго говоря, эта система отсчета не является инерциальной, так как Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца. Однако ускорения, связанные с этими движениями, малы, и обычно мы делаем лишь небольшую ошибку, пользуясь для описания движения на Земле законами Ньютона. Обычно, но не всегда.

Вспомним о знаменитом маятнике Фуко в Исаакиевском соборе в Ленинграде. Этот маятник не просто колеблется, но плоскость его колебаний еще и медленно поворачивается. Такой опыт впервые в 1851 г. сделал французский ученый Л. Фуко. Опыт проводился в огромном зале Парижского пантеона. Шар маятника весил 28 кг, а длина нити была равна 67 м.

Как же объяснить движение маятника Фуко? Ведь если бы на Земле строго выполнялись законы Ньютона, маятник колебался бы в одной плоскости. Значит, в неинерциальной системе отсчета законы Ньютона надо «исправить». Это делают, вводя специальные силы — силы инерции.

Неинерциальная система отсчета — это любая система, движущаяся по отношению к инерциальной с ускорением. Она может двигаться поступательно, может вращаться, возможны и комбинации этих движений. Наверное, самый простой пример неинерциальной системы отсчета — движущийся ускоренно лифт. При движении лифта вверх можно почувствовать «утяжеление» при разгоне лифта и приближение к невесомости при резком торможении. Если пользоваться в системе лифта законами Ньютона, то этого понять нельзя. На человека действует с и л а т я ж е с т и, и, так как в системе лифта он находится в состоянии покоя, сила реакции со стороны пола должна была бы равняться силе тяжести. Но из опыта ясно, что это не так. Поэтому к силе тяжести надо добавить какую-то силу при разгоне лифта и вычесть ее при замедлении. Это и есть с и л а и н е р ц и и:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a},$$

где $\vec{a}$ — ускорение лифта, m — масса человека. Теперь все в порядке: при разгоне лифта ускорение направлено вверх и сила инерции «утяжеляет» находящегося там человека, а при замедлении, наоборот, «облегчает» (см. рис.). Заметим, что сила инерции похожа на силу тяжести. Обе силы пропорциональны массе тела. В то же время сила инерции принципиально отличается от обычных сил, так как она не связана с взаимодействием реальных тел. Эти характерные особенности сил инерции сохраняются и во вращающейся системе.

Представьте себе, что вы кружитесь на карусели. Тогда вас обязательно прижимает к внешней стороне кресла, словно какая-то сила откидывает вас от центра вращения. Можно ли это понять, пользуясь законами Ньютона во вращающейся системе? Опять же нет. В этой системе вы покоитесь, а на вас действует сила реакции со стороны кресла, направленная к центру. Значит, второй закон Ньютона нарушается. Но все встает на свои места, если ввести во вращающейся системе силу инерции — ц е н т р о б е ж н у ю с и л у. Она уравновесит силу реакции кресла, и тогда понятно, почему в этой системе движения нет.

Теперь рассмотрим случай, когда человек не просто катается на карусели, но еще и перебирается из одного кресла в другое, например, в направлении вращения, т. е. движется с неко-

Силы инерции во вращающейся системе.

торой скоростью v_0 по окружности в системе карусели. Оказывается, что тогда появляется дополнительная сила инерции, откидывающая человека от центра:

$$F_{ин} = -m(\omega^2 r + 2\omega v_0),$$

где знак «—» указывает, что эта сила направлена от центра вращения; r — радиус карусели, ω — угловая скорость вращения, v_0— скорость вращения в системе карусели.

Первый член в правой части формулы — это уже знакомая нам центробежная сила. Она тем больше, чем сильнее вращение и чем дальше отстоит тело от центра. Второй член — кориолисова сила (от имени французского ученого Г. Кориолиса, впервые ее рассчитавшего в 1831 г.). Она действует только на тело, движущееся во вращающейся системе, и не зависит от его положения.

При движении во вращающейся системе не по окружности, а, например, по радиусу сила Кориолиса будет направлена вбок, перпендикулярно радиусу. Итак, при любом движении во вращающейся системе эта сила направлена перпендикулярно оси вращения и скорости тела.

Теперь понятно, что именно сила Кориолиса объясняет вращение плоскости колебаний маятника Фуко. И хотя действующая на Земле сила Кориолиса очень мала, она приводит еще к целому ряду весьма важных эффектов. Так, благодаря ей пассаты — ветры, дующие от тропиков к экватору,— отклоняются к западу. Она же объясняет закон Бэра — у рек в северном полушарии правый берег более крутой и подмытый, чем левый, а в южном — наоборот.

В этом случае сила Кориолиса прижимает воду к берегу в направлении вращения Земли, т. е. к правому — в северном полушарии и к левому — в южном.

Кориолисова сила приводит и к отклонению падающих тел к востоку. Этот эффект послужил одним из экспериментальных доказательств теории Кориолиса. В 1833 г. в фрейбургской шахте немецкий физик Ф. Райх провел очень точные эксперименты и показал, что при свободном падении тел с высоты 158 м их отклонение в среднем по 106 опытам составляет 28,3 мм.

Понятно, что силу Кориолиса необходимо учитывать и при движении ракет.

НЕЙТРИНО

Нейтрино — электрически нейтральная частица, относящаяся к *лептонам*. Название придумано Э. Ферми в 1932 г. и означает в переводе с итальянского «нейтрончик». Гипотезу о существовании нейтрино высказал В. Паули в 1930 г. с целью спасти *закон сохранения энергии*. Что же угрожало этому фундаментальному закону, лежащему в основе всей физики? Еще в 1914 г. Дж. Чедвик, будущий первооткрыватель *нейтрона*, нашел, что при *бета-распаде атомных ядер* кинетическая энергия испускаемых *электронов* принимает любые значения от нуля до некоторой максимальной величины E_{max}. Согласно закону сохранения энергии ожидалось, что электроны должны иметь строго фиксированное значение энергии, определяемое разностью энергий начального и конечного ядер. Именно такие свойства имели другие типы распадов. Паули предположил, что часть энергии уносится какой-то невидимой частицей, так что сумма ее энергии и энергии электрона, действительно, постоянна, а меняется лишь распределение энергии между этой частицей и электроном. В те годы были известны только *электрон, протон* и *фотон* и нужна была большая научная смелость для такого предположения.

Созданная Э. Ферми в 1934 г. теория β-распада (с участием нейтрино) подтверждалась экспериментами. Но прошло более 20 лет, пока физики сумели «поймать» нейтрино, что объясняется необычными свойствами этой частицы.

Будучи электрически нейтральным, нейтрино не участвует в электромагнитных взаимодействиях. Как и все *лептоны*, оно не подвержено также влиянию *сильных взаимодействий*. Отсюда и вытекают значительные трудности наблюдения нейтрино: само оно следов в *детекторах ядерных излучений* не оставляет и регистрируется по следам заряженных частиц, рожденных в реакции с его участием. Но вероятность таких реакций, вызываемых *слабыми взаимодействиями*, очень мала, и потому нейтрино обладает колоссальной проникающей способностью. Даже стальная плита толщиной в расстояние от Земли до Солнца не может послужить для него преградой: такая плита задержит лишь одно из ста миллионов нейтрино. Наблюдение реакции, вызванной нейтрино, стало возможным только после создания ядерных реакторов (см. *Ядерные реакции*). В результате β-распада осколков деления урана испускаются антинейтрино в количестве примерно 6 частиц на 1 деление. Поток антинейтрино от мощного реактора достигает 10^{13} частиц на 1 см^2 в 1 с, так что даже при малой вероятности можно дождаться реакции, вызванной антинейтрино. Первым прямым наблюдением нейтрино считается реакция $\tilde{\nu}_e + p \to n + e^+$, зарегистрированная Ф. Райнесом и К. Коуэном в 1953 г., в опытах на реакторе в Ханфорде (США) ($\tilde{\nu}_e$ — антинейтрино, p — протон, n — нейтрон, e^+ — позитрон).

Как и в случае заряженных лептонов, нейтрино не тождественно своей античастице. Проявляется это в разных свойствах нейтрино, рожденных в различных условиях. Так, нейтрино, образующееся в паре с электроном (e^-) при β-распаде нейтрона, $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$, может вызвать обратную реакцию: $\tilde{\nu}_e + p \to n + e^+$, а нейтрино, появившееся на свет в паре с позитроном в процессе β-распада *протона* внутри ядра: $p \to n + e^+ + \nu_e$, такую реакцию не вызывает. На этом свойстве были основаны опыты, доказавшие в середине 50-х гг. различие нейтрино ν_e и антинейтрино $\tilde{\nu}_e$. Аналогичным способом было доказано, что нейтрино, рождающиеся в паре с мюонами (μ^-, μ^+), отличны от электронных нейтрино. Всего существуют, таким образом, следующие виды *нейтрино:* ν_e, $\tilde{\nu}_e$, ν_μ, $\tilde{\nu}_\mu$, ν_τ, $\tilde{\nu}_\tau$. Последняя пара нейтрино связана с недавно открытым тяжелым тау-лептоном (τ-лептоном).

На вопрос, какими физическими причинами вызвано различие свойств разных типов нейтрино, полного ответа в науке пока не дано. Введенные для описания этих различий отдельные типы лептонных зарядов (см. *Лептоны*) до сих пор еще не имеют ясного физического объяснения. Более очевидны причины различий *нейтрино* и антинейтрино одного типа. Как и заряженные лептоны, нейтрино имеет *спин*, равный 1/2. Из *квантовой механики* следует, что такие частицы могут находиться в двух состояниях поляризации со спином, направленным вдоль или против их импульсов. По каким-то причинам наблюдавшиеся до сих пор нейтрино всегда имели спин, направленный против их импульса. Спин антинейтрино, наоборот, всегда параллелен их импульсу. Таким образом, нейтрино отличается от антинейтрино не только знаком лептонного заряда, но и своей спиральностью (проекцией спина на направление импульса). С этим свойством нейтрино связано нарушение зеркальной симметрии в слабых процессах с испусканием нейтрино (см. *Четность*).

Представляет большой интерес вопрос о количестве разных типов нейтрино. Имеются только оценки на основе экспериментальных астрофизических данных, поскольку число видов нейтрино связано с относительным содержанием гелия во Вселенной (см. *Астрофизика*). Оказывается, это число не слишком велико: примерно 4—6. Таким образом, не исключено, что уже открыты почти все виды нейтрино. Окончательный ответ на этот вопрос, видимо, будет получен в будущих опытах на ускорителях.

Масса покоя нейтрино обычно считается равной нулю, как у *фотона*. Но в отличие от фотона для этого нет серьезных оснований, ни теоретических, ни экспериментальных. В результате экспериментов было получено, что $m(\nu_e) \lesssim 30$ эВ/с^2, $m(\nu_\mu) \lesssim 0{,}5$ МэВ/с^2, $m(\nu_\tau) \lesssim 250$ МэВ/с^2. В 1980 г. ученые Института экспериментальной и теоретической физики сообщили, что по их измерениям масса покоя нейтрино $\tilde{\nu}_e$ с вероятностью 99% лежит в пределах от 14 до 46 эВ/с^2. Так ли это в действительности, покажут дальнейшие эксперименты.

Нейтрино — столь же распространенная частица, как и *фотон*. Нейтрино образуются в слабых распадах ядер и *элементарных ча-*

β-спектр, образующийся при слабом распаде ядер. Кинетическая энергия может принимать непрерывный ряд значений, что объясняется различным распределением энергии между электроном и невидимым в распаде нейтрино. Если нейтрино имеет конечную массу покоя, то спектр меняет свой вид вблизи максимально возможного значения энергии E_0 электрона (показана пунктиром возможная разница энергий).

стиц, а последние в свою очередь рождаются при столкновениях *протонов космических лучей* с частицами *атмосферы* и межзвездного газа. Мощные потоки нейтрино испускаются звездами в результате происходящих в их недрах термоядерных реакций. Предполагается, что нейтрино в изобилии рождаются при гравитационном коллапсе звезд. Наконец, все пространство заполнено нейтринным газом, оставшимся от ранних этапов развития Вселенной; этот газ аналогичен реликтовому излучению (см. *Фотон, Астрофизика*). Реликтовые нейтрино практически невозможно наблюдать, хотя их содержится примерно 150 частиц каждого вида в 1 см^3.

Последние годы отмечены бурным развитием нейтринной физики. Большую информацию дает изучение взаимодействий нейтрино с *элементарными частицами*. Так, наблюдение реакции $\tilde{\nu}_\mu + e^- \to \tilde{\nu}_\mu + e^-$ означало открытие нового вида *слабых взаимодействий*, предсказанных объединенной теорией Глэшоу, Вайнберга и Салама (см. *Единство сил природы*). Особый интерес представляет изучение процессов взаимодействия нейтрино высоких энергий с *адронами*, где нейтринные пучки играют роль микроскопа, просвечивающего частицы и дающего сведения об их структуре. Все эти результаты были получены в опытах на ускорителях, в которых использовались мощные потоки нейтрино высоких энергий и огромные современные экспериментальные установки для регистрации нейтринных взаимодействий с веществом.

Начинает развиваться нейтринная астрономия, изучающая нейтринное излучение внеземных источников с целью получения сведений о происходящих в космосе процессах. В СССР в районе Эльбруса (долина реки Баксан) и в соляных шахтах Артемовска работают нейтринные обсерватории Института ядерных исследований. Баксанский нейтринный телескоп расположен под склоном горы на высоте 1700 м над уровнем моря и на расстоянии 550 м от начала штольни. Телескоп представляет собой четырехэтажное здание размером $16 \times 16 \times 11$ м и состоит из четырех вертикальных и четырех горизонтальных плоскостей, покрытых сцинтилляционными детекторами (см. *Детекторы ядерных излучений*). Всего в телескопе 3120 детекторов, а полный вес сцинтиллятора — 330 т. Телескоп «ловит» мюоны, которые образуются при взаимодействии нейтрино с веществом, расположенным вокруг установки. С его помощью ведутся поиски нейтринных вспышек от коллапсирующих и сверхновых звезд, поиски распада протона, магнитных монополей и другие исследования.

Нейтрино — единственный вид излучения, который приходит на Землю из недр Солнца и звезд и несет о них ценную информацию.

НЕЙТРОН

Нейтрон — нейтральная частица, относящаяся к классу *адронов*. Открыта в 1932 г. английским физиком Дж. Чедвиком. Вместе с *протонами* нейтроны входят в состав *атомных ядер*. Электрический заряд нейтрона q_n равен нулю. Это подтверждается прямыми измерениями заряда по отклонению пучка нейтронов в сильных электрических полях, показавшими, что $|q_n| < 10^{-20}\ e$ (здесь e — элементарный электрический заряд, т. е. абсолютная величина заряда электрона). Косвенные данные дают оценку $|q_n| < 2 \cdot 10^{-22}\ e$. *Спин* нейтрона равен 1/2. Как адрон с полуцелым спином он относится к группе барионов (см. *Протон*). У каждого бариона есть античастица; антинейтрон был открыт в 1956 г. в опытах по рассеянию антипротонов на ядрах. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком барионного заряда; у нейтрона, как и у протона, барионный заряд равен $+1$.

Как и протон и прочие адроны, нейтрон не является истинно элементарной частицей: он состоит из одного u-кварка с электрическим зарядом $+2/3$ и двух d-кварков с зарядом $-1/3$, связанных между собой глюонным полем (см. *Элементарные частицы, Кварки, Сильные взаимодействия*).

Нейтроны устойчивы лишь в составе стабильных атомных ядер. Свободный нейтрон — нестабильная частица, распадающаяся на протон (p), электрон (e^-) и электронное антинейтрино ($\tilde{\nu}_e$) (см. *Бета-распад*): $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$. Время жизни нейтрона составляет (917 ± 14) с, т. е. около 15 мин. В веществе в свободном виде нейтроны существуют еще меньше вследствие сильного поглощения их ядрами. Поэтому они возникают в природе или получаются в лаборатории только в результате *ядерных реакций*.

По энергетическому балансу различных ядерных реакций определена величина разности масс *нейтрона* и *протона*: $m_n - m_p = (1{,}29344 \pm 0{,}00007)$ МэВ. Из сопоставления ее с массой протона получим *массу нейтрона*: $m_n = 939{,}5731 \pm 0{,}0027$ МэВ; это соответствует $m_n \simeq 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ г, или $m_n \simeq 1840\ m_e$, где m_e — масса электрона.

Нейтрон участвует во всех видах фундаментальных взаимодействий (см. *Единство сил природы*). Сильные взаимодействия связывают нейтроны и протоны в *атомных ядрах*. Пример слабого взаимодействия — *бета-распад* нейтрона — здесь уже рассматривался. Участвует ли эта нейтральная частица в электромагнитных взаимодействиях? Нейтрон обладает внутренней структурой, и в нем при общей нейтральности существуют электрические токи, приводящие, в частности, к появлению у нейтрона *магнитного момента*. Иными словами,

в магнитном поле нейтрон ведет себя подобно стрелке компаса. Это лишь один из примеров его электромагнитного взаимодействия.

Большой интерес приобрели поиски дипольного электрического момента нейтрона, для которого была получена верхняя граница: $d_n < 2 \cdot 10^{-25} e \cdot$см. Здесь самые эффективные опыты удалось поставить ученым Ленинградского института ядерной физики АН СССР. Поиски дипольного момента нейтронов важны для понимания механизмов нарушения инвариантности относительно обращения времени в микропроцессах (см. *Четность*).

Гравитационные взаимодействия нейтронов наблюдались непосредственно по их падению в поле *тяготения* Земли.

Сейчас принята условная классификация нейтронов по их кинетической энергии: медленные нейтроны ($< 10^5$ эВ, есть много их разновидностей), быстрые нейтроны ($10^5 \div 10^8$ эВ), высокоэнергичные ($> 10^8$ эВ). Весьма интересными свойствами обладают очень медленные нейтроны (10^{-7} эВ), получившие название ультрахолодных. Оказалось, что ультрахолодные нейтроны можно накапливать в «магнитных ловушках» и даже ориентировать там их спины в определенном направлении. С помощью магнитных полей специальной конфигурации ультрахолодные нейтроны изолируются от поглощающих стенок и могут «жить» в ловушке, пока не распадутся. Это позволяет проводить многие тонкие эксперименты по изучению свойств нейтронов.

Другой метод хранения ультрахолодных нейтронов основан на их волновых свойствах. При малой энергии длина волны де Бройля (см. *Квантовая механика*) настолько велика, что нейтроны отражаются от ядер вещества подобно тому, как свет отражается от зеркала. Такие нейтроны можно просто хранить в замкнутой «банке». Эта идея была высказана советским физиком Я. Б. Зельдовичем в конце 1950-х гг., и первые результаты были получены в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований спустя почти десятилетие. Недавно советским ученым удалось построить сосуд, в котором ультрахолодные нейтроны живут до своего естественного распада.

Свободные нейтроны способны активно взаимодействовать с атомными ядрами, вызывая ядерные реакции. В результате взаимодействия медленных нейтронов с веществом можно наблюдать резонансные эффекты, дифракционное рассеяние в кристаллах и т. п. Благодаря этим своим особенностям нейтроны широко используются в *ядерной физике* и физике *твердого тела*. Они играют важную роль в *ядерной энергетике*, в производстве *трансурановых элементов* и радиоактивных *изотопов*, находят практическое применение в химическом анализе и в геологической разведке.

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

Изменяются ли оптические характеристики среды под действием светового пучка, проходящего сквозь среду? До появления *лазеров* на этот вопрос давали отрицательный ответ. Действительно, электрическая напряженность поля световой волны от нелазерных источников света не превышает 10^5 В/м, тогда как внутриатомные поля характеризуются напряженностями порядка $10^8 \div 10^{12}$ В/м. При таком «соотношении сил» световая волна практически не влияет на внутриатомные поля, а следовательно, и на характеристики среды. Поэтому отклик среды (поляризация P) на внешнее воздействие (на напряженность поля световой волны E) оказывается линейным: $P = \varkappa E$, где $\varkappa$ — диэлектрическая восприимчивость среды. Отсюда и происходит термин «линейная оптика», используемый сегодня в применении к долазерной оптике.

С появлением лазеров ситуация качественно изменилась. Высокая степень когерентности лазерного излучения позволяет осуществлять необычайно сильную концентрацию световой мощности. Лазеры дают световые поля напряженностью до 10^{10}—10^{11} В/м. Теперь диэлектрическая восприимчивость среды зависит от напряженности поля световой волны; поэтому зависимость P от E оказывается нелинейной. Так, если $\varkappa = \varkappa + \varkappa_1 E$, то $P = \varkappa_0 E + \varkappa_1 E^2$. Отсюда происходят названия терминов «нелинейная оптика», «нелинейная поляризация» (слагаемое $\varkappa_1 E^2$ в предыдущем выражении), «нелинейная среда» (среда с нелинейной поляризацией).

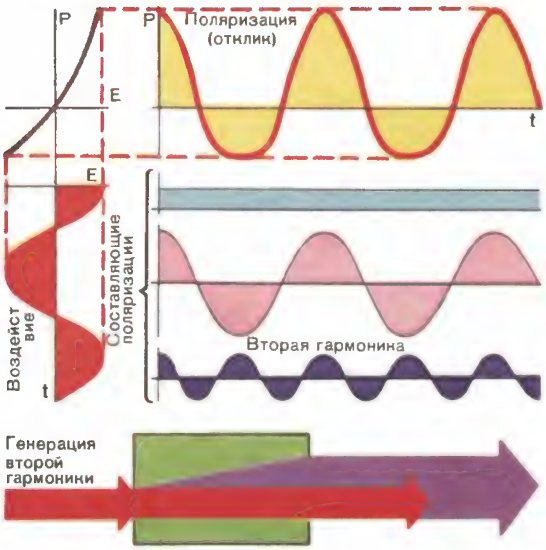
Под понятием *нелинейная оптика* объединяют совокупность оптических явлений, обусловленных нелинейностью отклика среды (ее *поляризации*) на внешнее воздействие (на поле световой волны). Проще говоря, речь идет об оптических явлениях, обусловленных нелинейной поляризацией среды под действием интенсивного лазерного излучения.

К числу таких явлений относится явление удвоения частоты света (явление генерации второй оптической гармоники): при определенных условиях лазерное излучение частоты ν, проходя сквозь нелинейный кристалл, частично превращается во вторую гармонику — в излучение частоты 2ν. Возможность такого превращения легко продемонстрировать математически. Подставим выражение для бегущей световой волны $E = E_0 \cos [2\pi\nu \cdot (t - z/v)]$ в упоминавшееся ранее соотношение $P = \varkappa_0 E = \varkappa_1 E^2$. В результате получаем:

$$P_1 = \varkappa_0 E_0 \cos [2\pi\nu(t - z/v)] + \frac{1}{2}\varkappa_1 E_0^2 + \frac{1}{2}\varkappa_1 E_0^2 \cos [4\pi\nu(t - z/v)].$$

Видно, что возникает волна нелинейной поляризации на частоте 2ν. При определенных усло-

Поляризация света. *Внизу*: генерация второй гармоники.



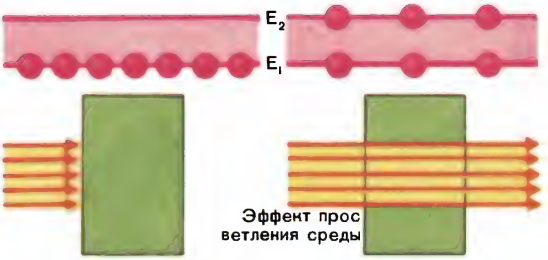
виях эта волна поляризации переизлучит световую волну на той же частоте.

В нелинейных средах происходит не только удвоение частоты света, но и получение более высоких оптических гармоник; происходит также сложение и вычитание частот. Кроме того, возможна плавная перестройка частоты света (явление параметрической генерации света).

Круг нелинейно-оптических явлений не ограничивается преобразованиями оптических частот. В нелинейной среде можно наблюдать, например, удивительное явление самофокусировки светового пучка: вместо того чтобы расходиться, световой пучок, наоборот, сжимается в тонкую световую нить (как бы самофокусируется). Это явление было предсказано в 1961 г. советским физиком Г. Аскарьяном. Отметим также нелинейно-оптические явления просветления и затемнения среды. В первом случае непрозрачная среда обратимо просветляется при падении на нее интенсивного светового импульса; во втором — наоборот, первоначально прозрачная среда становится непрозрачной при облучении светом. Явление просветления среды наблюдали советские физики С. И. Вавилов и В. Л. Левшин еще в 1925 г. Используя свет от мощной искры, они зафиксировали снижение коэффициента поглощения уранового стекла на 1,5% (при погрешности измерений 0,3%). Это был первый в мире нелинейно-оптический эксперимент.

Для объяснения явления просветления среды предположим, что поглощающие свет частицы имеют всего два уровня энергии (E_1 и E_2). В исходном состоянии все частицы находятся на уровне E_1. Когда на среду начинают падать *фотоны* с энергией $E_2 - E_1$, происходит поглощение света средой, при этом частицы совер-

Эффект просветления среды.



шают переходы с уровня E_1 на уровень E_2. Когда на обоих уровнях окажется одинаковое число частиц, среда станет прозрачной (теперь фотон с энергией $E_2 - E_1$ с одинаковой вероятностью может инициировать как переход $E_1 \rightarrow E_2$, так и обратный переход).

Для объяснения явления затемнения среды предположим, что энергия фотона вдвое меньше энергии $E_2 - E_1$. При малых интенсивностях света фотоны могут поглощаться частицами среды только поодиночке; поэтому поглощения света не происходит — среда прозрачна. При увеличении интенсивности света растет вероятность поглощения сразу двух фотонов; при этом частица переходит с уровня E_1 на E_2. Возрастание вероятности поглощения света и означает затемнение первоначально прозрачной среды.

В развитии нелинейной оптики и ее практических применений большую роль сыграли работы советских физиков Р. В. Хохлова и С. А. Ахманова. Одно из важнейших практических применений — создание умножителей оптических частот и параметрических генераторов света. Первые позволяют расширить диапазон генерируемого когерентного оптического излучения, продвинуться в область более высоких частот, а вторые — осуществлять плавную перестройку и подстройку частоты когерентного света.

НИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Почему нагреть тело довольно легко (зажгите спичку, и вы мгновенно получите температуру в 1000° С), а вот охладить — даже на 100—200 градусов довольно сложная техническая задача? Причина в том, что увеличение *температуры* приводит к усилению теплового хаотического движения, к увеличению беспорядка в системе. А именно в этом направлении самопроизвольно идут термодинамические процессы (см. *Термодинамика*). При охлаждении, напротив, приходится придумывать обходные пути, компенсировать уменьшение беспорядка другими способами.

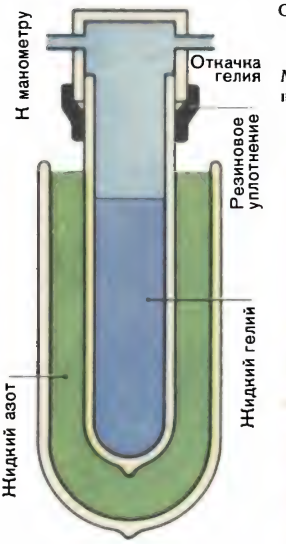
Наиболее распространенный способ охладить систему — это теплоизолировать ее и заставить совершить работу. Например, газ в сосуде с поршнем, расширяясь, совершает работу, и если его теплоизолировать, то по *закону сохранения энергии* внутренняя энергия и соответственно температура газа уменьшаются. При этом и закон возрастания *энтропии*, конечно, не нарушается, так как степень беспорядка (энтропия) зависит не только от температуры, но и от объема системы. Такой способ охлаждения называют детандерным (детандер — сосуд с поршнем), и он в усовершенствованном виде нашел самое широкое распространение в современной технике получения низких температур.

Для охлаждения тел до низких температур обычно используют сжиженные газы. Ведь если тело поместить в такую жидкость, то увеличится только интенсивность *кипения*, а температура жидкости останется неизменной, пока она вся не выкипит.

Многие сжиженные газы имеют очень низкие температуры кипения. Сжижение кислорода впервые осуществил в 1877 г. французский инженер Л. Кальете́ и тем самым сумел достичь температуры —183°С (температура кипения кислорода при нормальном давлении), а в начале 1878 г. он сжижил азот (—196° С). В этом же году швейцарскому ученому Р. Пикте́ удалось сжижить воздух, используя метод каскадного охлаждения (жидкость, полученную после сжижения одного газа, можно затем использовать для сжижения следующего с более низкой температурой кипения и т. д.).

Следующий участок пути к абсолютному нулю преодолел английский ученый Дж. Дьюар. Низкую температуру надо не только создать, но и удержать. Для хранения жидких газов он придумал так называемый сосуд Дьюара. Термос, которым все привыкли пользоваться,— это типичный сосуд Дьюара. Теплоизоляция осуществляется за счет *вакуума* между стеклянными стенками. Дьюар предложил свою конструкцию в 1892 г., и она была столь хороша, что осталась почти неизменной до наших дней. В 1898 г. Дьюар получил жидкий водород с температурой кипения —252,6°С. Еще более низкую температуру кипения имеет жидкий гелий —268,8°С. Его впервые получил нидерландский ученый Х. Камерлинг-Оннес.

Исследования при низких температурах — очень важный раздел физики. Дело в том, что таким образом можно избавиться от помех, связанных с хаотическим тепловым движением, и изучать явления в «чистом» виде. Особенно важно это при исследовании квантовых закономерностей (см. *Квантовая механика*). Обычно из-за хаотического теплового движения происходит усреднение физической величины по большому числу ее различных значений и квантовые скачки «замазываются». Однако при низких температурах становится возможным наблюдать макроскопические квантовые явления — *сверхпроводимость* и *сверхтекучесть*.



Сосуд Дьюара.

Магнитный беспорядок и магнитный порядок.

Очень низкие температуры получают с помощью магнитного охлаждения. Для этого используют парамагнитные соли, молекулы которых, подобно маленьким магнитикам, обладают *магнитными моментами*. Эти моменты ориентированы хаотично, но во внешнем поле они выстраиваются вдоль его направления. Поэтому, выключая поле, можно увеличить беспорядок в системе и, теплоизолировав систему, добиться уменьшения температуры. Таким способом удается получить температуру, всего на стотысячную долю градуса отличающуюся от абсолютного нуля.

Сейчас имеются и другие способы получения сверхнизких температур. Отметим, что и само значение абсолютного нуля по шкале Цельсия тоже уточнилось. Это —273,15° С.

О

ОДНОВРЕМЕННОСТЬ

Одновременность двух событий, происшедших в одной точке пространства, определяется с помощью *принципа причинности*. Мы говорим, что события одновременны, если ни одно из них не может быть причиной или следствием другого. Или, иными словами, если часы в данной точке — выбранный нами эталон *времени* — зафиксировали, что оба события произошли в один и тот же момент.

Казалось бы, столь же просто и понять смысл слов: два события одновременно произошли в разных точках. На самом деле все не так очевидно. Попробуем привлечь принцип причинности. Пусть в точке *1* произошло событие *A*.

Допустим, в нашем распоряжении имелась бы возможность передавать сигналы (информацию) с бесконечной скоростью. Тогда в точке *2* мгновенно можно узнать о событии, происшедшем в точке *1*. Информация передается без какой-либо траты времени, и только одно-единственное событие *B* в точке *2* не может оказаться следствием или причиной события *A*. В этом случае нет какой-либо разницы между понятиями одновременности в одной точке и разных точках пространства. Все сказанное можно сформулировать более четко с помощью представления о синхронных часах, помещенных в разные точки пространства. От одних часов с бесконечной скоростью постоянно посылаем сигналы к другим. Если показания часов *2* в моменты приема сигналов совпадают с показаниями часов *1* в моменты их отправления, то часы *1* и *2*, по определению, идут синхронно. Соответственно, одновременными мы называем и события *A* и *B*, если по показаниям часов *1* и *2* они произошли в одни и те же моменты. Если бы в классической физике проводили анализ и определение понятия одновременности, то они выглядели бы именно так, как только что было рассказано.

Однако в действительности в природе не существует сигналов, распространяющихся с бесконечной скоростью. Нет возможности передавать сигналы мгновенно. Максимальная скорость распространения сигналов конечна. Тогда прежде, чем в точку *2* придет сигнал о событии *1*, пройдет интервал времени $\Delta t = \frac{l}{c}$ (здесь l — расстояние между точками *1* и *2*, c — скорость сигнала), в течение которого в точке *2* ничего нельзя знать о событии *1*. Все, что случится в точке *2* в этом интервале времени, по существу, не может быть причинно связано с событием *1*.

Рассматриваемый вариант можно наглядно пояснить с помощью любопытного исторического примера. Известие о смерти Екатерины II фельдъегерь вез из Петербурга в Иркутск 34 дня. (Скорость фельдъегеря практически была максимальной для России тех времен.) Все это время Иркутск жил при правлении Екатерины, хотя в Петербурге уже царствовал Павел I. Иначе говоря, практически принципиально этот отрезок времени разделял возможность причинной связи между точками *1* и *2*. Конечно, можно возразить: мы отлично знаем, что существуют скорости, неизмеримо бóльшие, чем скорость конной тройки. Но все же, как определять одновременность, если в природе есть такая максимальная скорость?

Из всего сказанного можно сделать вывод, что понятие *одновременности* совсем неочевидно (см. *Относительности теория*).

ОЛИМПИАДЫ ФИЗИЧЕСКИЕ

Физические олимпиады в нашей стране прошли уже большой путь развития. Вначале олимпиады проводились крупными вузами. Так, в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова первая олимпиада по физике была организована еще в 1938 г. В начале 1960-х гг. большое внимание проведению олимпиад начали уделять в Сибирском отделении Академии наук СССР, в Московском физико-техническом институте и в ряде других крупных вузов. Но проводить много олимпиад силами разных учебных заведений, причем часто в одном городе, нецелесообразно. Поэтому уже с 1966 г. олимпиада стала Всероссийской, а с 1968 г.— Всесоюзной.

В настоящее время олимпиада по физике проходит как составная часть Всесоюзной физико-математической и химической олимпиады школьников, которая проводится ежегодно Министерством просвещения СССР совместно с ЦК ВЛКСМ, Академией наук СССР, Академией педагогических наук СССР и другими заинтересованными организациями.

Олимпиада проходит в пять этапов. Первый этап — школьный — проводится под руководством учителя физики непосредственно в школе. В нем принимают участие все желающие учащиеся VII—X классов. Этот этап самый массовый, общее число его участников обычно превышает 2 млн. человек.

Второй этап — районный (городской). В районных олимпиадах участвуют

Школьники — участники физической олимпиады.

победители школьных олимпиад, как правило, по одному лучшему школьнику от класса, что составляет примерно 300 тыс. участников.

В областных олимпиадах участвуют команды школьников, сформированные из числа победителей районных и городских олимпиад. Общее число участников этого этапа около 10 тыс. человек.

Четвертый этап — республиканские олимпиады, в которых участвуют примерно 1500 победителей областных олимпиад и победителей конкурса журнала «Квант» из числа учащихся VIII—X классов.

В пятом — всесоюзном этапе участвуют команды от каждой республики, сформированные из числа победителей республиканских олимпиад. В заключительном этапе принимают участие, кроме того, школьники, получившие дипломы первой и второй степени на предыдущей олимпиаде. Общая численность участников этого этапа олимпиады около 150 человек.

Одна из основных задач олимпиады — развитие интереса к физике и творческих способностей у возможно большего числа учащихся. Интерес к продолжению какой-либо деятельности побуждается достигнутыми успехами. Поэтому организаторы олимпиады уделяют большое внимание подбору задач. Олимпиадная задача, как правило, содержит четкую постановку проблемы, решение которой возможно на основе использования известных школьникам физических законов, однако в необычной ситуации, требующей творческого поиска. Для того чтобы олимпиада одновременно способствовала развитию интереса к физике у всех участников и позволяла выявить наиболее способных, в комплекс задач включаются задания разного уровня сложности.

На третьем — пятом этапах физической олимпиады в число задач включаются задания экспериментального характера. Экспериментальные задания, как и задачи теоретического тура, одинаковы для всех участников олимпиады из одного класса. На экспериментальном туре успехи участников оцениваются по их способности планировать проведение экспериментального исследования, собирать установки и электрические схемы для проведения эксперимента, выполнять измерения физических величин, оценивать точность полученных результатов, оформлять отчеты по результатам эксперимента.

В ходе республиканского и заключительного этапов олимпиады школьники встречаются с крупными учеными, знакомятся с достижениями науки, техники, культуры тех республик и городов, в которых проходит олимпиада, участвуют в вечерах дружбы в школах.

Успешные выступления на олимпиаде предполагают систематические занятия физикой. Подготовка школьников к олимпиадам по физике начинается на уроке, но в основном она проводится во внеурочной работе — на занятиях факультативов, физических кружков, в научных обществах учащихся, а также в процессе самостоятельной работы школьников.

Олимпиады помогают учащимся определить свое жизненное призвание, стать высококвалифицированными специалистами. Большая часть победителей республиканского и заключительного этапов олимпиады по окончании школы поступают в высшие учебные заведения физического профиля.

Национальные олимпиады по физике проводятся во многих странах. С 1967 г. с целями повышения интереса молодежи к физике и технике, развития контактов в области школь-

ного физического образования, укрепления дружбы и взаимопонимания молодежи разных стран проводятся международные физические олимпиады школьников, в которых успешно выступают и советские учащиеся.

ОПТИКА

Когда-то под оптикой понимали науку о зрении. Именно таков точный смысл слова «оптика». В средние века оптика постепенно превратилась из науки о зрении в науку о свете; этому способствовало изобретение линз и камеры-обскуры. Ныне *оптика* — это раздел физики, где исследуются процессы испускания света, распространение света в различных средах, его взаимодействие с веществом. Что же касается вопросов, связанных со зрением, устройством и функционированием глаза, то они выделились в специальное научное направление, называемое физиологической оптикой.

При рассмотрении многих оптических явлений (например, явлений, связанных с преломлением света на границе двух сред) можно пользоваться представлением о световых лучах — геометрических линиях, вдоль которых распространяется световая энергия. В этом случае говорят о *геометрической* (лучевой) *оптике*. Основу геометрической оптики составляют закон взаимной независимости световых лучей и принцип наименьшего времени, сформулированный в XVII в. французским математиком П. Ферма́ (см. *Геометрическая оптика*). Геометрическая оптика широко используется в светотехнике и при рассмотрении действия многочисленных *оптических приборов* и устройств — начиная от лупы и очков и кончая сложнейшими оптическими микроскопами и телескопами.

В начале XIX в. развернулись интенсивные исследования открытых ранее явлений *интерференции, дифракции* и *поляризации света* (О. Френель, Т. Юнг, Э. Малюс и др.). Эти явления не находили объяснения в рамках геометрической оптики, необходимо было рассматривать свет в виде поперечных волн. Так возникла волновая оптика. Первоначально полагали, что световые волны — упругие волны в некоей среде (мировом эфире), которая будто бы заполняет все мировое пространство. В 1864 г. английский физик Дж. Максвелл создал электромагнитную теорию света, согласно которой волны света — это *электромагнитные волны*, попадающие в соответствующий диапазон длин волн.

Исследования, выполненные в начале XX в., показали, что для объяснения некоторых явлений, например *фотоэффекта,* необходимо представить световой пучок в виде потока своеобразных частиц — световых квантов, или, иначе говоря, *фотонов* (А. Эйнштейн). Заметим, что еще 200 лет назад И. Ньютон придерживался аналогичной точки зрения на природу света в своей «теории истечения света» (хотя, конечно, ньютоновские корпускулы не имеют ничего общего с фотонами). Теперь представления о световых квантах изучает квантовая оптика.

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ РОЖДЕСТВЕНСКИЙ (1876 — 1940)

Советский физик, академик, один из организаторов оптической промышленности в нашей стране.

Родился в Петербурге. В 1900 г. окончил с отличием Петербургский университет. Через три года он стал преподавателем этого университета, где в 1919 г. организовал физическое отделение и коренным образом изменил преподавание физики в соответствии с требованиями времени.

В 1909 г. ученый сделал сообщение на заседании физического отделения Русского физико-химического общества об исследовании в области спектрального анализа (см. *Спектроскопия*). Эта его работа была крупным вкладом в теорию спектрального анализа. Рождественский разработал новый метод определения зависимости показателя преломления от длины световой волны. С помощью этого метода можно также определять интенсивность спектральных линий — одну из важнейших характеристик *атомов.*

Рождественский развил и усовершенствовал теорию микроскопа, указал на важную роль *интерференции* при образовании изображения в микроскопе.

В старой России не было оптической промышленности, а необходимые оптические приборы приобретались за рубежом. Закупки различной оптики за границей сократились вскоре после того, как по инициативе Д. С. Рождественского, поддержанной Советским правительством, в 1918 г. в Петрограде был создан Государственный оптический институт, который ученый возглавлял до 1932 г.

Д. С. Рождественский воспитал большую школу советских ученых-оптиков.

Оптика — один из древнейших разделов физики: ведь людей с незапамятных времен привлекали солнечные лучи и волновала загадка зрения. И вместе с тем оптика — одно из наиболее бурно развивающихся направлений современной физики. Родившись как наука о зрении, оптика превратилась в науку о свете — о его рождении, распространении,

Можно ли считать, что геометрическая, волновая, квантовая оптика являются последовательными этапами в развитии оптики? Нет, так считать нельзя. Волновая оптика, действительно, возникла позже геометрической, однако ее возникновение вовсе не «отменяет» геометрическую оптику, равно как квантовая оптика не «отменяет» волновую. У каждой из указанных оптик есть свои области применения, свой круг практических задач. Например, для построения изображения в микроскопе и определения увеличения можно использовать геометрическую оптику; при рассмотрении же разрешающей способности микроскопа необходимо обратиться к волновой оптике (поскольку разрешение ограничивают дифракционные эффекты).

Строго говоря, квантовая оптика соответствует наиболее последовательному с физической точки зрения рассмотрению оптических явлений. При определенных условиях (когда фотоны сильно концентрируются в каких-то состояниях) поток фотонов уподобляется световой волне. Волновая оптика оказыва-

взаимодействии с веществом. Особый импульс оптические исследования получили в последние два десятилетия — в связи с появлением лазеров. Современная оптика характеризуется множеством интереснейших научно-технических направлений.

ется, таким образом, своеобразным предельным случаем квантовой оптики. Если при этом можно пренебречь (по условию рассматриваемой задачи) длиной волны света, как если бы она обратилась в нуль, то волновая оптика «переходит» в геометрическую. Следовательно, геометрическая оптика является своеобразным предельным случаем волновой оптики.

Удивительно, насколько велика роль оптики в развитии современной физики. Возникновение двух наиболее важных и революционных физических теорий XX столетия (*квантовой механики* и *теории относительности*) в существенной мере связано с оптическими исследованиями. Оптические методы анализа вещества на молекулярном уровне породили специальное научное направление — молекулярную оптику. К ней теснейшим образом примыкает оптическая спектроскопия, широко применяемая в современном материаловедении, исследованиях *плазмы, астрофизике*. Оптические представления и модели используются в электронике и *ядерной физике*. Существуют электронная оптика и ней-

тронная оптика; созданы электронный микроскоп и нейтронное зеркало. Разработаны оптические модели *атомных ядер*.

Способствуя развитию разных направлений современной физики, оптика в то же время и сама переживает сегодня период бурного развития. Основной толчок этому развитию дало изобретение интенсивных источников когерентного света — *лазеров* (Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, В. А. Фабрикант, Ч. Таунс). В результате волновая оптика поднялась на более высокую ступень, соответствующую когерентной оптике. Трудно даже перечислить все новейшие научно-технические направления, развивающиеся (и развивавшиеся) благодаря появлению лазеров. Среди них *нелинейная оптика, голография*, радиооптика, пикосекундная оптика, адаптивная оптика и др. Радиооптика возникла на стыке радиотехники и оптики; она исследует оптические методы передачи и обработки информации. Эти методы обычно сочетают с традиционными электронными методами; в результате сложилось научно-техническое направление, называемое оптоэлектроникой. Передача световых сигналов по диэлектрическим волокнам составляет предмет волоконной оптики. Используя достижения нелинейной оптики, можно исправлять (корректировать) волновой фронт светового пучка, искажающийся при распространении света в той или иной среде, например в атмосфере или в воде. В результате возникла и интенсивно развивается так называемая адаптивная оптика. К ней тесно примыкает зарождающаяся на наших глазах фотоэнергетика, занимающаяся, в частности, вопросами эффективной передачи световой энергии по лучу света. Современная лазерная техника позволяет получать световые импульсы длительностью порядка всего лишь пикосекунды (10^{-12} с). Такие импульсы оказываются уникальным «инструментом» для исследования целого ряда быстропротекающих процессов в веществе, и в частности в биологических структурах (например, для исследования процессов фотосинтеза). Возникло и развивается специальное направление — пикосекундная оптика; к нему тесно примыкает фотобиология. Можно без преувеличения сказать, что широкое практическое использование достижений современной оптики — обязательное условие научно-технического прогресса. Оптика открыла человеческому разуму дорогу в микромир, она же позволила ему проникнуть в тайны звездных миров. Оптика охватывает все стороны нашей практической деятельности (вспомним о фотографии, кино, телевидении). *Лазерная технология* — важнейший элемент современного производства (см. *Лазер*).

ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ (1879 — 1944)

Советский физик, академик.

Родился в Могилеве, в семье врача. В 1897 г. по окончании Одесской гимназии поступил в Новороссийский университет на физико-математический факультет. За участие в студенческих волнениях был исключен из университета и дальнейшее образование продолжал в Германии, в Страсбурге.

В 1914 г. Мандельштам вернулся на родину и занялся преподавательской деятельностью. В 1925 г. он возглавил кафедру теоретической физики Московского университета, здесь у него учились многие будущие известные советские физики.

С 1934 г. Мандельштам работает в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева. Основные его научные труды посвящены проблемам *оптики*, радиофизики, радиотехники, *теоретической физики*. Еще в 1907 г., исследуя колебательные процессы в электрических цепях, ученый открыл принцип слабой связи, широко используемый теперь в радиотехнике. Теорию *колебаний* он успешно применял не только в радиофизике, но и в оптике, *акустике*, молекулярной физике, *квантовой механике*.

В 1928 г. Л. И. Мандельштам и советский физик Г. С. Ландсберг открыли принципиально новое явление — комбинационное рассеяние света. Если облучать вещество светом с одной длиной волны (монохроматическим светом), то в рассеянном этим веществом свете появляются новые длины волн. Они возникают в результате взаимодействия молекул вещества с падающим на них светом. Недаром спектры комбинационного рассеяния Мандельштам называл «языком молекул».

Всемирную известность получили работы Л. И. Мандельштама по распространению радиоволн вдоль земной поверхности. Он теоретически предсказал и экспериментально подтвердил еще одно новое физическое явление — параметрический резонанс (1931), позволившее создать параметрические генераторы переменного тока.

В 1942 г. Л. И. Мандельштам был удостоен Государственной премии СССР.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Оптические приборы открыли человеку два полярных по масштабам мира — космический с его огромными протяженностями и микроскокический, населенный мельчайшими организмами. Телевизионная передача, демонстрация кинофильма, быстрая съемка рельефа местности, точное измерение расстояний и скоростей возможны только благодаря использованию оптических приборов.

Наиболее распространены приборы, формирующие изображения. Это телескоп и бинокль, микроскоп и лупа, фотоаппарат и диапроектор... Проекционный аппарат — один из самых характерных приборов, формирующих изображение (рис. 1). Если проекционный аппарат приспособлен для показа кино, его называют киноаппаратом. Если же он используется для демонстрации диапозитивов, то это диапроектор. В диапроекторе прозрачный снимок — диапозитив $Д$, освещенный светом конденсора $К$, помещают вблизи фокальной плоскости объектива так, чтобы на экране получалось четкое изображение. Размер изображения зависит от расстояния проектора от экрана. При изменении этого расстояния необходимо менять и положение объектива относительно диапозитива. Если вместо экрана поставить освещенный предмет, то он изобразится в месте расположения диапозитива. Теперь, если вместо диапозитива поставить пленку и убрать конденсор, получается схема фотоаппарата.

Оптическая схема глаза человека также напоминает схему фотоаппарата. Глаз формирует изображение на своей сетчатке. Размеры изображения предмета на сетчатке глаза зависят от того, под каким углом мы видим предмет. Так, угловой диаметр Солнца 32′. Этим углом и определяется размер изображения Солнца на сетчатке. Когда две крайние точки предмета видны под углом, меньшим 1′, они сливаются на сетчатой оболочке и предмет представляется наблюдателю точкой. В этом случае говорят, что разрешающая способность глаза не превышает одной угловой минуты.

Телескоп дает возможность увеличивать угол, под которым виден отдаленный предмет. Первый телескоп создал в начале XVII в. Г. Галилей. Опишем ход лучей от удаленного предмета в современной зрительной трубе. От крайних точек предмета на объектив падают параллельные лучи и очерчивают контур предмета в фокальной плоскости. Через окуляр изображение рассматривается под углом φ_u, бóльшим, чем φ_n, под которым виден предмет невооруженным глазом. Угловое увеличение телескопа $\varphi_u / \varphi_n = \gamma_1 / \gamma_2$. Оптическая схема, приведенная на рис. 2, — это схема рефрактора — телескопа с линзовым объективом. Телескоп с

Электронный микроскоп.

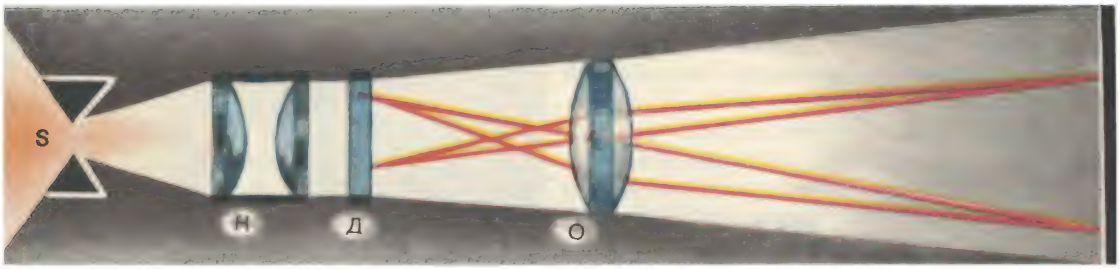
зеркальным объективом называют рефлектором или отражательным телескопом. Впервые рефлектор был построен И. Ньютоном в 1668 г. (рис. 3).

Телескоп с диаметром объектива D позволяет наблюдать предметы или точки предмета, находящиеся на угловом расстоянии $1{,}22\ \lambda/D = 140''/D$, если считать, что длина световой волны, испускаемой объектом, $\lambda = 0{,}5$ мкм. Получается, что чем больше диаметр телескопа, тем более мелкие детали объекта различимы с его помощью. У самых больших рефракторов диаметр объектива не превышает 1 м. Технически проще изготовить зеркало большого диаметра и построить рефлектор.

Самый большой в мире телескоп с 6-метровым зеркалом построен в Советском Союзе. Он предназначен для наблюдения переменных галактик, пульсаров, квазаров и других космических объектов.

Чтобы рассмотреть малый предмет под большим углом, его подносят как можно ближе к глазу. Однако глазной хрусталик отчетливо изображает предмет на сетчатке, если он помещен не ближе 10 см от глаза. При меньших расстояниях максимальная кривизна хрусталика оказывается недостаточной для получения четкого изображения на сетчатке. Поэтому очень малые предметы рассматривают через лупу или микроскоп — приборы, увеличивающие угол, под которым виден предмет.

Рис. 1. Проекционный аппарат. *S* — источник света; *К* — конденсор, *Д* — диапозитив; *О* — объектив.



Лупы, изобретенные в XVII в. нидерландским естествоиспытателем А. Левенгуком, первооткрывателем мира микроорганизмов, давали увеличение в 300 раз. Схема микроскопа была усовершенствована в 1660-х гг. английским ученым Р. Гуком. Но до 20-х гг. XIX в. микроскопы не могли конкурировать с очень хорошими лупами. Прогресс был достигнут благодаря разработке сложных объективов из многих линз. Минимальные размеры предмета, различимого в микроскоп, определяются зависимостью: $d = 0{,}51\lambda/A$. Здесь A — постоянная, равная примерно 1. Для зеленого света $d = 0{,}3$ мкм. Чтобы предмет был виден под углом 1′, достаточно увеличение в 1000 раз.

Рис. 2. Схема телескопа-рефрактора. *1* — окуляр; *2* — объектив.

Спектральные оптические приборы предназначены для исследования спектрального состава света. Они играют важную роль в развитии науки и применяются как для изучения процессов, протекающих в микромире, так и для прикладных целей. Например, с помощью современной спектральной аппаратуры можно судить о форме *атомного ядра* и производить точный элементный анализ вещества. Пример спектрального прибора — спектроскоп (рис. 4), в котором спектр излучения можно наблюдать визуально. Основная часть спектроскопа — призма или дифракционная решетка. Исследуемое излучение линза собирает на щели коллиматора — устройства, формирующего пучок света малой расходимости — «параллельный» пучок. Пройдя сквозь призму, такой пучок превращается в n пучков, идущих под разными углами, если излучение состоит из *электромагнитных волн* с длинами $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$. Линза $Л_2$ на экране даст n изображений щели A, которые и образуют спектр. Когда требуется изучить «почти» монохроматическое излучение, например спектральный состав одной линии, последовательно со спектроскопическим призменным прибором устанавливают прибор большой разрешающей силы. Без предварительного разложения света приборы высокого разрешения применять нельзя, потому что они могут работать только в очень узком диапазоне длин волн.

Создание *лазеров* открыло новые пути в опти-

Рис. 3. Схема телескопа-рефлектора *1* — объектив; *2* — окуляр; *3* — входной зрачок.

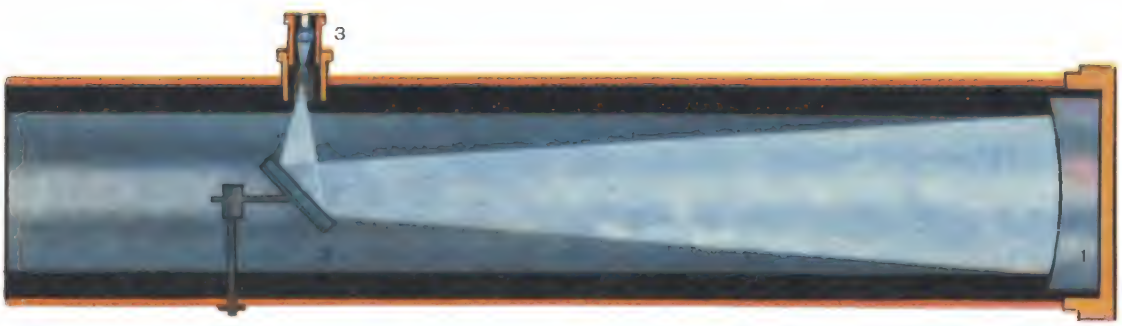
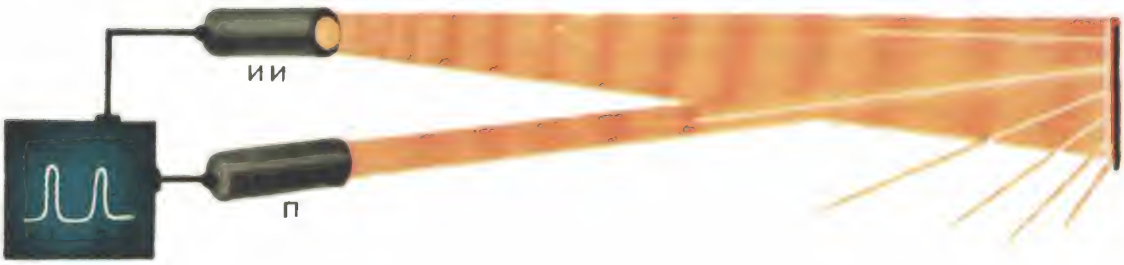


Рис. 4. Спектроскоп. $Л_1$, $Л_2$ — линзы; $П$ — призма; S — источник света.

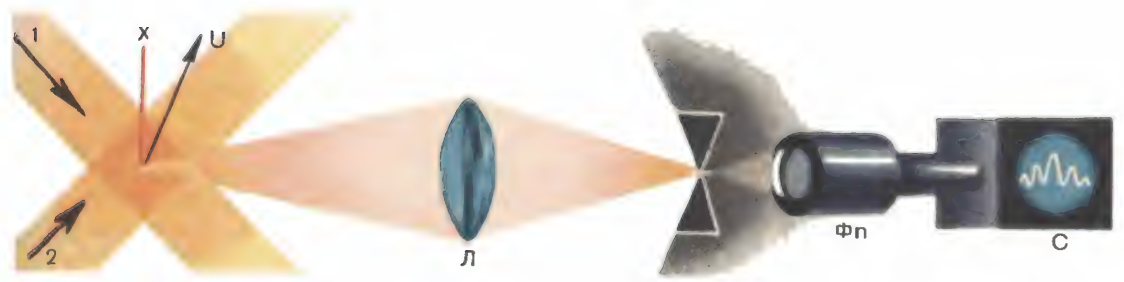
ческом приборостроении. Современные лазерные *гироскопы* способны работать при высоких механических перегрузках, их можно устанавливать на ракетах, космических кораблях. Построены лазерные магнитометры для измерения слабых магнитных полей, приборы для измерения распределения частиц по скоростям и размерам. Успешно используются для различных целей лазерные оптические локаторы (рис. 5). Высокая яркость лазерного излучения дает возможность передавать его на большие расстояния, а малая длительность лазерного импульса обеспечивает исключительную точность измерения расстояний. Интересно устроен лазерный измеритель скоростей (рис. 6). Отраженный от движущейся частицы, лазерный свет изменит свою частоту колебаний. При обычных скоростях это изменение, обусловленное *эффектом Доплера*, ничтожно. И все же благодаря высокой стабильности фазы и монохроматичности лазерного света его удается измерить, а по измеренной величине определить скорость частицы, например движущейся в турбулентном потоке жидкости (см. *Турбулентность*).

Рис. 5. Оптический локатор. *ИИ* — импульсный источник света; *П* — приемник фотоэлектрический; *1, 2* — устройство обработки информации.



Физики и инженеры разрабатывают оптическую вычислительную машину. Проектная мощность ее — более 1 млрд. операций в секунду, т. е. в десятки раз больше, чем у существующих ныне самых «быстрых» ЭВМ. Основой такой машины станут лазерные устройства. И память у нее будет оптической, основанной на голографической записи данных (см. *Голография*). На голограмме размером 10×10 см^2 можно записать более 100 млн. единиц информации: для подобного объема информации потребовалось бы около 1 млн. страниц печатного текста. С помощью голографической оптики выполняются сегодня сложные математические расчеты, дифференцирование функций, интегральные операции, решаются сложнейшие уравнения. Оптические элементы — составная часть конструкции многих приборов. Так, управляемые оптические транспаранты дают возможность изображение, полученное с помощью не воспринимаемого глазом электромагнитного излучения, преобразовать в видимое излучение.

Рис. 6. Лазерный измеритель скоростей. *1, 2* — лучи лазера; *Л* — линза, *ФП* — фотоприемник; *С* — устройство обработки информации.



Оптические приборы, основанные на волоконной оптике, позволяют осматривать внутренние органы человека и предотвращать тяжелые заболевания.

Итак, современные оптические приборы совершенно необходимы и широко используются во многих отраслях народного хозяйства, в научных исследованиях.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ТЕОРИЯ

Теория относительности, созданная в первой четверти XX в. выдающимся физиком А. Эйнштейном, представляет собой общую теорию *пространства*, *времени* и *тяготения*. До ее создания в науке господствовали представления о пространстве и времени классической ньютоновской *механики*. С появлением *квантовой механики* выяснилось, что представления классической физики имеют ограниченную область применения. В частности, они неприменимы при больших скоростях движения тел, сравнимых со скоростью *света* (см. *Релятивистская механика*). Уравнения *электродинамики*, сформулированные в 1860-х гг. Дж. Максвеллом, оказались не совместимыми с уравнениями ньютоновской механики. Противоречия особенно обострились после осуществления *опыта Майкельсона*, результаты которого никак нельзя было объяснить в рамках классической физики.

Следует различать специальную теорию относительности, описывающую физические явления в инерциальных *системах отсчета* (Эйнштейн опубликовал ее в завершенном виде в 1905 г.), и общую теорию относительности о законах гравитационных полей (в основном завершенную к 1916 г.).

Специальная теория относительности. Всего два основных постулата отличают специальную теорию относительности от классической физики.

Первый — обобщенный принцип относительности, утверждающий, что во всех инерциальных системах отсчета законы механики одинаковы. Это значит, что любой эксперимент даст один и тот же результат в любой инерциальной системе.

В классической физике принцип относительности утверждался только для законов механики. В специальной теории относительности он провозглашен как общий закон природы. Согласно ему законы природы инвариантны во всех инерциальных системах отсчета. Иными словами, уравнения, выражающие любые физические законы, инвариантны относительно преобразования от одной инерциальной системы к другой. Или, как уже говорилось, эксперименты в разных инерциальных системах с электромагнитными полями, ядерным распадом, расширением газов и т. д. всегда будут давать одни и те же результаты.

Рассмотрим теперь второй постулат специальной теории относительности.

Все тела в природе связаны между собой силами взаимодействия. Физическая природа этих сил различна. Наука изучает четыре основных вида взаимодействий: электромагнитные взаимодействия, гравитационные (см. *Тяготение*), *слабые* и *сильные взаимодействия* (последние два вида описывают свойства *атомных ядер* и *элементарных частиц*).

Но даже не касаясь сущности фундаментальных взаимодействий (см. *Единство сил природы*), можно поставить один общий вопрос: существует ли максимальная скорость (предел) передачи взаимодействий от одного тела к другому?

Например, при столкновениях элементарных частиц часто рождаются новые частицы. Существует ли минимальное время, необходимое, чтобы прибор, находящийся на расстоянии l от точки столкновения, мог зафиксировать факт их рождения? Или же в принципе какой-либо прибор может среагировать мгновенно? Если минимальное время существует, то какое взаимодействие (или поле, как принято говорить в физике) «добежит» раньше: электромагнитное? гравитационное? а быть может, сильное?

На этот и множество подобных вопросов в классической физике и в специальной теории относительности даются совершенно разные ответы. Так, ньютоновская механика утверждает, что в принципе возможно распространение взаимодействий (т. е. передача сигналов, информации) с бесконечной скоростью. А второй постулат специальной теории относительности гласит, что существует предельная скорость распространения взаимодействий. Она совпадает со скоростью света в вакууме. Опыт доказывает правоту этого утверждения.

Постулаты специальной теории относительности приводят ко многим замечательным и удивительным следствиям, вытекающим из нее, к парадоксальным на первый взгляд ее отличиям от привычной нам физики Ньютона.

Рассмотрим, например, основное для физики понятие «события». Оно означает все, что можно зафиксировать приборами — вспышку света, взрыв, попадание электрона в счетчик и др. Координаты и момент времени каждого события фиксируются в произвольной инерциальной системе отсчета. Разумеется, эти координаты и моменты времени могут быть различны.

Например, в какой-то инерциальной системе K координаты какого-то события A будут $(xyzt)$, а в другой системе K' — соответственно $(x'\ y'\ z'\ t')$. Нужно учитывать при этом, что системы K и K' движутся относительно

друг друга с постоянной скоростью v.

Возьмем теперь отдельно систему K, жестко связанную с Землей (для наглядности не будем учитывать, что эта система инерциальна). Начало координат свяжем с Москвой. Отсчет времени поведем по сигналам московского времени.

Систему отсчета K' свяжем с поездом Москва — Владивосток (снова полагаем для простоты, что система «поезд» инерциальна). Начало координат выберем в первом купе первого вагона. А отсчет времени будем вести, например, по сигналам местного, владивостокского времени.

Тогда все события, происходящие по пути в первом купе первого вагона, в системе отсчета «поезд» имеют координату 0. А в системе «Москва» координаты этих событий будут меняться от нуля (событие в момент отправления) до 8000 км (событие, происшедшее во Владивостоке). И время событий приборы в системе «поезд» и в системе «Москва» будут отмечать разное. Потому что различны начала отсчета времени: ноль часов по московскому и ноль — по владивостокскому времени.

Рассмотрим теперь какие-то два события I и II в нашем купе. В системе «поезд» их пространственные и временны́е координаты $(0t_1')$ и $(0t_2')$. В системе «Москва» — координаты (x_1t_1) и (x_2t_2). Конечно, расстояние между двумя событиями вполне может быть различно и в классической физике. В системе «Москва» оно $(x_2 - x_1)$, а в системе «поезд» строго равно нулю. Итак, расстояние между событиями относительно уже в классической механике. Моменты t_1 и t_1' также, как мы договорились, различны. Но вот разность $(t_2' - t_1')$ строго равна в классической физике разности $(t_2 - t_1)$.

Таковы законы ньютоновской физики, и если хорошо разобраться, то можно убедиться, что фундаментальное утверждение: обязательно и непременно $(t_2 - t_1) \equiv (t_2' - t_1')$ — есть однозначное следствие предположения о возможности передачи сигналов с бесконечной скоростью. Равенство это и означает абсолютность времени в классической физике.

В специальной теории относительности *время* оказывается относительным. Снова пусть события I и II фиксируются в произвольных инерциальных системах K и K'. Координаты событий — $(x_1y_1z_1t_1)$, $(x_2y_2z_2t_2)$ и $(x_1'y_1'z_1't_1')$, $(x_2'y_2'z_2't_2')$ соответственно. Тогда только из принципа относительности и конечности скорости распространения взаимодействия следует равенство:

$$S_{12}^2 = c^2\Delta t_{12}^2 - \Delta r_{12}^2 = c^2(\Delta t_{12}')^2 - (\Delta r_{12}')^2 \equiv \equiv (S_{12}')^2. \qquad (1)$$

Здесь введены обозначения:

$$\Delta t_{12} = (t_2 - t_1);\ \Delta t_{12}' = (t_2' - t_1');$$

$$\Delta r_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2};$$

аналогично определяется $\Delta r_{12}'$.

А вот c и есть максимальная скорость передачи взаимодействия; она же скорость света. Величина S_{12} называется интервалом.

Теперь при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой сохраняется (остается инвариантной) не разность $(t_2 - t_1)$, а интервал S_{12}. Инвариантность интервала лежит в основе всего математического аппарата специальной теории относительности. Очевидно, что если интервал больше, или меньше, или равен нулю в одной инерциальной системе, то он соответственно больше, или меньше, или равен нулю в любой другой инерциальной системе отсчета. Если события таковы, что квадрат интервала между ними в какой-то инерциальной системе больше нуля, то всегда можно найти такую инерциальную систему, в которой эти события произошли в одной точке. Для этого используем равенство:

$$c^2\Delta t_{12}^2 - \Delta r_{12}^2 = c^2(\Delta T_{12})^2. \qquad (2)$$

Перепишем его так:

$$\Delta t_{12}^2\left(1 - \frac{\Delta r_{12}^2}{\Delta t_{12}^2 c^2}\right) = (\Delta T_{12})^2. \qquad (3)$$

Как из верхней, так и из нижней формулы видно, что $\Delta t_{12}^0 < \Delta t_{12}$. Действительно, чтобы получить ΔT_{12}^0, надо умножить Δt_{12} на число, меньшее единицы.

Итак, промежуток времени между событиями в такой инерциальной системе отсчета, где они происходят в одной точке, минимален. А можно ли в нашем случае $(S_{12} > 0)$ найти систему, где события произошли в один момент времени? Очевидно, нет. Равенство $c^2\Delta t_{12}^2 - \Delta r_{12}^2 = -\Delta r_{12}^2$ выполняться не может.

Если два события происходят с одним телом, то S_{12}^2 обязательно больше нуля. В этом случае $\Delta r_{12}^2 = v^2\Delta t_{12}^2$, где v — скорость тела. Но всегда $v < c$. Поэтому

$$S_{12}^2 = c^2\Delta t_{12}^2 - v^2\Delta t_{12}^2 = \Delta t_{12}^2(c^2 - v^2) > 0.$$

Если события происходят с одним телом, равенство (3) можно переписать так:

$$\Delta t_{12}^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = (\Delta T_{12})^2.$$

Систему отсчета, в которой события произошли в одной точке, называют собственной системой отсчета, а время T — собственным временем.

Здесь нет возможности рассмотреть все многочисленные следствия специальной теории относительности. В этой статье показано основное отличие специальной теории относительности от классической физики. Требование инвариантности промежутка $(t_2 - t_1)$ заменяется в ней требованием инвариантности интервала S_{12}.

Отметим еще два из замечательных следствий специальной теории относительности.

Во-первых, *одновременность* двух событий относительна. Если два события, происшедшие в разных точках, одновременны в одной инерциальной системе отсчета, то они неодновременны во всех других системах. Во-вторых, тело с массой покоя m (см. *Релятивистская механика*) обладает энергией $E = mc^2$. Это вполне реальная энергия. Она может выделяться, если уменьшить массу тела. Она и выделяется: чуть-чуть при химических реакциях и в миллионы раз интенсивней при *ядерных реакциях*.

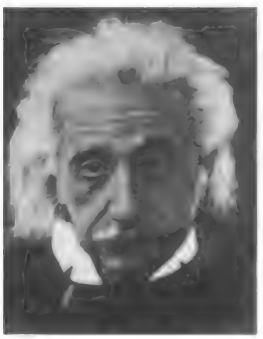
А для того чтобы рассказать обо всех следствиях специальной теории относительности, понадобилась бы целая книга.

Общая теория относительности. Идеи общей теории относительности трудно изложить в одной статье и популярно, и достаточно полно. Здесь возможно дать о них только самое общее представление.

Общую теорию относительности часто называют современной теорией гравитационного поля, а также теорией структуры «пространства — времени», геометрии «пространства — времени». Иногда говорят, что она описывает законы природы в *неинерциальных системах отсчета*. Все это правильно. Попробуем понять, почему же такие, казалось бы, совершенно различные формулировки по сути относятся к одному и тому же понятию.

Уже в специальной теории относительности *время* и *пространство* оказались связанными. Вся ее логика опирается на понятие интервала и на постулат инвариантности интервала при преобразованиях координат. Интервал между двумя событиями имеет

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН (1879 — 1955)



Выдающийся физик, создатель *теории относительности*, один из создателей квантовой теории и *статистической физики*.

Родился в Германии, в городе Ульме. С 14 лет вместе с семьей жил в Швейцарии, где в 1900 г. окончил Цюрихский политехникум. В 1902—1909 гг. служил экспертом патентного бюро в Берне. В эти годы Эйнштейн создал специальную теорию относительности, выполнил исследования по статистической физике, *броуновскому движению*, теории излучения и др. Работы Эйнштейна получили известность, и в 1909 г. он был избран профессором Цюрихского университета, а затем — Немецкого университета в Праге. В 1914 г. Эйнштейн был приглашен преподавать в Берлинский университет. В период своей жизни в Берлине он завершил создание общей теории относительности, развил квантовую теорию излучения. За открытие законов *фотоэффекта* и работы в области *теоретической физики* Эйнштейн получил в 1921 г. Нобелевскую премию. В 1933 г. после прихода к власти в Германии фашистов Эйнштейн эмигрировал в США, в Принстон, где он до конца жизни работал в Институте высших исследований.

В 1905 г. была опубликована специальная теория относительности — механика и электродинамика тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света (см. *Относительности теория*).

Тогда же Эйнштейн открыл закон взаимосвязи массы и энергии ($E = mc^2$), который лежит в основе всей *ядерной энергетики*.

Ученый внес большой вклад в развитие квантовой теории. В его теории фотоэффекта свет рассматривается как поток квантов (*фотонов*). Существование фотонов было подтверждено в 1922 г. в экспериментах американского физика А. Комптона. Эйнштейн установил основной закон фотохимии (закон Эйнштейна), по которому каждый поглощенный квант света вызывает одну элементарную фотохимическую реакцию. В 1916 г. он теоретически предсказал явление индуцированного (вынужденного) излучения атомов, лежащее в основе квантовой электроники.

Вершиной научного творчества Эйнштейна стала общая теория относительности, завершенная им к 1916 г. Идеи Эйнштейна изменили господствовавшие в физике со времен Ньютона механистические взгляды на пространство, время и тяготение и привели к новой, материалистической картине мира.

Ученый работал и над созданием единой теории поля, объединяющей гравитационные и электромагнитные взаимодействия (см. *Единство сил природы*).

Научные труды Эйнштейна сыграли большую роль в развитии современной физики — *квантовой электродинамики, атомной* и *ядерной физики*, физики *элементарных частиц, космологии, астрофизики*.

А. Эйнштейн был членом многих академий мира и научных обществ. В 1926 г. его избрали почетным членом Академии наук СССР.

вид: $S_{12}^2 = c^2\Delta t_{12}^2 - \Delta r_{12}^2$. При выводе этого выражения помимо постулатов специальной теории относительности предполагалось, что в «обычном» трехмерном пространстве справедлива геометрия Евклида. Действительно, квадрат расстояния между двумя точками равен $\Delta r_{12}^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$ на основании теоремы Пифагора. А она выполняется только в геометрии Евклида. Еще в первой половине XIX в. в результате работ русского математика Н. И. Лобачевского и венгерского математика Я. Больяй ученые пришли к выводу, что кроме евклидовой геометрии возможны и иные геометрии.

Для двухмерных пространств — поверхностей — все это очень легко представить наглядно. Ясно, что геометрия поверхности шара совершенно отлична от геометрии плоскости. И прежде всего надо определить на поверхности шара, что такое аналог прямой линии. Сравнительно несложно убедиться, что роль отрезков прямых должны выполнять дуги большого круга. Тогда, например, сумма углов сферического треугольника окажется больше 2π; найдутся и многие другие свойства, немыслимые в евклидовой плоской геометрии.

Для реального мира геометрия Евклида столь же приближенно справедлива, как и механика Ньютона. В специальной теории относительности было показано, однако, что для больших скоростей механика Ньютона неверна. А какова же истинная геометрия реального мира? Никакая проверка геометрии мира невозможна, пока не будет предъявлен реальный физический объект. А этот объект, эталон, мы выбираем сами, опираясь на опыт и интуицию. Если вернуться к прямой, то для физика наиболее естественно считать прямой ту линию, по которой в вакууме распространяется луч света. И тогда можно поставить конкретный вопрос: какова геометрия пространства, если прямой линией считать линию распространения света в вакууме?

Однако все не так просто, как кажется с первого взгляда. Ведь уже специальной теорией относительности доказано, что *пространство* и *время* нельзя рассматривать раздельно. И на самом деле приходится анализировать четырехмерный мир: пространство — время.

В специальной теории относительности аналог трехмерного расстояния — и н т е р в а л. Действительно ли он таков, как принято этой теорией?

В общей теории относительности А. Эйнштейн предположил, что в действительности интервал имеет более сложный вид и что специальная теория относительности выполняется лишь приближенно.

Итак, общая теория относительности — это теория геометрии *пространства — времени*.

Теперь настал момент спросить: при чем тут поле *тяготения*? Эйнштейн пришел к мысли о том, что вид интервала (геометрия пространства) полностью определяется распределением и движением тяготеющих масс. А в искривленном пространстве законы движения изменяются.

И наконец, причем здесь *неинерциальные системы отсчета*? На основании общей теории относительности неинерциальность системы отсчета эквивалентна появлению некоторого гравитационного поля. *Движение* тел в неинерциальной системе подчиняется тем же законам, что и движение в инерциальной системе в присутствии гравитационного поля.

Такова в основных чертах схема идей общей теории относительности.

Современная *космология* основана на общей теории относительности, почти все наблюдаемые ею факты укладываются в схему этой теории.

Назовем четыре эксперимента, подтверждающие справедливость общей теории относительности.

1. Изменение частоты света при прохождении луча в гравитационном поле. Квант света, двигаясь в гравитационном поле, может приобретать или терять энергию, в зависимости от того, «помогает» или «мешает» ему разность гравитационных потенциалов.

Впервые этот эффект наблюдался как красное смещение линий в спектрах тяжелых звезд. Чтобы «уйти» от звезды, квант света должен отдать часть энергии.

Некоторое время тому назад этот эффект удалось измерить в лаборатории (с помощью *эффекта Мессбауэра*).

2. «Искривление» луча света в сильном гравитационном поле. Это означает, что прямая линия в гравитационном поле отлична от прямой линии вне поля.

Этот эффект наблюдался как смещение видимого положения звезд на небе, когда луч света от звезды проходил вблизи Солнца. Разумеется, наблюдать звезду на малых угловых расстояниях от Солнца можно лишь во время солнечного затмения.

3. Смещение перигелия Меркурия. Ближайшая к Солнцу точка орбиты Меркурия медленно перемещается в пространстве относительно орбит других планет. Этот факт был обнаружен в 1845 г. и никак не мог быть объяснен классической механикой Ньютона.

Вычисленное на основе общей теории относительности смещение орбиты Меркурия совпало с результатом эксперимента.

4. И наконец, еще один эксперимент был проведен в лаборатории с помощью *эффекта Мессбауэра*. На краю диска помещали источник квантов, вблизи к центру диска — приемник квантов. Когда диск начинали вращать, оказывалось, что частота квантов, приходящих в приемник, меняется. Этот эффект предсказан теорией относительности.

П

ПАУЛИ ПРИНЦИП

В одном и том же квантовом состоянии (см. *Квантовая механика*) может находиться не более одной частицы с полуцелым *спином*.

Существует требование перестановочной симметрии тождественных объектов: никакие физические явления не должны изменяться при перестановке двух идеально одинаковых частиц, например двух *электронов* или двух *нейтронов* (см. *Симметрия законов природы*).

Два туриста, боясь перепутать одинаковые палки, выкрасили их в разные цвета; затем поняли, что можно было покрасить лишь одну палку. Если же подумать еще немного, станет ясно, что в покраске нет необходимости — два идеально одинаковых предмета спутать нельзя. Если они одинаковы, нет способа установить отличие, это непроверяемое, а значит, ненаучное утверждение.

В квантовой механике состояние системы описывают волновой функцией. Физические величины выражаются через квадрат этой функции. Поэтому есть две возможности, не нарушающие перестановочной симметрии: первая — при перестановке частиц волновая функция не изменяется; и вторая — она изменяет знак при такой перестановке. То же самое получается из требования, чтобы волновая функция не изменялась при двукратной перестановке.

В работе, оказавшей большое влияние на всю последующую физику, швейцарский ученый В. Паули показал, что первая возможность осуществляется для частиц с целым спином, а вторая — для частиц с полуцелым спином. Таким образом, волновая функция изменяет знак при перестановке, скажем, двух электронов (спин электрона равен 1/2) и не изменяет при перестановке двух пи-мезонов (спин пи-мезона равен нулю). Теперь нетрудно понять *принцип запрета Паули*: две частицы с полуцелым спином не могут находиться в одинаковом состоянии.

Предположим, что две частицы с полуцелым спином находятся в одинаковом состоянии, тогда их перестановка не может изменить волновую функцию. Между тем, по теореме Паули, волновая функция должна была бы изменить знак. Следовательно, такая волновая функция равна нулю. Но волновая функция определяет вероятность нахождения частицы в данном состоянии; если она равна нулю, значит, такое состояние невозможно — две частицы с полуцелым спином не могут находиться в одинаковом состоянии.

Принцип Паули определяет распределение *электронов* по атомным оболочкам (см. *Атом*). Так, на 1 *s*-оболочке атома водорода (орбитальный момент $l = 0$, главное квантовое число $n = 1$) возможны только два разных состояния электрона с проекциями спина на выделенное направление, равными $+1/2$ и $-1/2$. Поэтому на этой оболочке находятся два электрона — больше нельзя поместить по принципу Паули. На $2p$-оболочке главное квантовое число $n = 2$, орбитальный момент $l = 1$, число проекций орбитального момента равно $2l + 1 = 3$, и в каждом из этих состояний возможны две проекции спина электрона, поэтому всего есть шесть состояний, и на этой оболочке могут разместиться шесть электронов.

Не менее важные заключения следуют из применения принципа Паули к свободным электронам в *металле*. Рассмотрим вместо металла, в котором на свободные электроны действует поле периодически расположенных атомов, более простой случай — пусть свободные электроны движутся в потенциальном ящике с высокими стенками. Согласно квантовой механике, возможные состояния определяются из условия, что на длине ящика должно укладываться целое число полуволн. Если в ящик насыпать электроны и искать состояния с наинизшей энергией, то по мере увеличения числа электронов будут заполняться все более высокие состояния — на каждом уровне будет находиться по два электрона с противоположными спинами. Поэтому в наинизшем состоянии всей системы электронов имеются частицы всех импульсов, от самых малых, порядка $\hbar/l$, до самых больших, соответствующих границе заполнения. Такое, обусловленное принципом Паули заполнение состояний называют распределением Ферми, а энергию самых быстрых электронов — энергией Ферми. Из закона квантования частиц в ящике (см. *Квантовая механика*) нетрудно получить связь плотности частиц (со спином 1/2) с граничным импульсом p_F распределения Ферми:

$$n = \frac{p_F^3}{3\pi^2\hbar^3}.$$

Энергия Ферми равна $E_F = p_F^2/2m$.

В классической физике предполагалось, что при абсолютном нуле температуры все частицы покоятся. Согласно принципу Паули, свободные электроны металла даже при абсолютном нуле имеют скорости того же порядка, что и скорости связанных в атоме электронов.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева играет важнейшую роль в естествознании. Она была разработана на основе обобщения большого количества химических сведений о свойствах элементов и их соединений, но объяснить причину периодического изменения свойств химия оказалась не в состоянии. Объяснение дала физика, в рамках которой было осуществлено физическое обоснование периодического закона и разработана теория периодической системы.

«Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости от их атомного веса» — такую классическую формулировку дал Д. И. Менделеев периодическому закону в 1871 г. Она соответствует химическому этапу в развитии менделеевского учения о периодичности.

На смену ему пришел этап физический. После того как было доказано, что заряд ядра атома Z численно равен порядковому номеру соответствующего элемента в периодической системе (см. *Атом*), закон получил физическое обоснование, и его формулировка стала звучать так: свойства элементов, простых веществ и их соединений находятся в периодической зависимости от величин Z.

ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ МЕНДЕЛЕЕВ (1834 — 1907)

Дмитрий Иванович Менделеев родился в 1834 г. в Тобольске, в семье директора местной гимназии. Дом Менделеевых был настоящим духовным центром города — там собирались передовая тобольская интеллигенция и отбывавшие ссылку декабристы. Общение с людьми прогрессивных убеждений оказало сильное влияние на формирование мировоззрения будущего ученого.

Получив аттестат зрелости, Менделеев поступил на физико-математический факультет Главного педагогического института в Петербурге и уже в студенческие годы приступил к самостоятельным научным исследованиям. Институт он окончил в 1855 г. с золотой медалью. В последующие три с лишним десятилетия Менделеев сочетал научную деятельность с преподаванием химии, в 1865 г. он стал профессором Петербургского университета.

Заслуги Менделеева перед химией огромны, открытые им периодический закон и *периодическая система химических элементов* легли в основу химической науки. Но считать Менделеева только химиком было бы совершенно ошибочно. Советский ученый академик С. И. Вавилов говорил, что по разнообразию интересов, по плодотворности трудов в самых различных областях науки, техники и культуры имя Менделеева может быть поставлено в один ряд с именами таких гениев, как Леонардо да Винчи, М. В. Ломоносов. Чем только не занимался — и причем в высшей степени профессионально — Менделеев! Тут и приемы стекловарения, и горное дело, и агрономия, и педагогика, и искусствоведение...

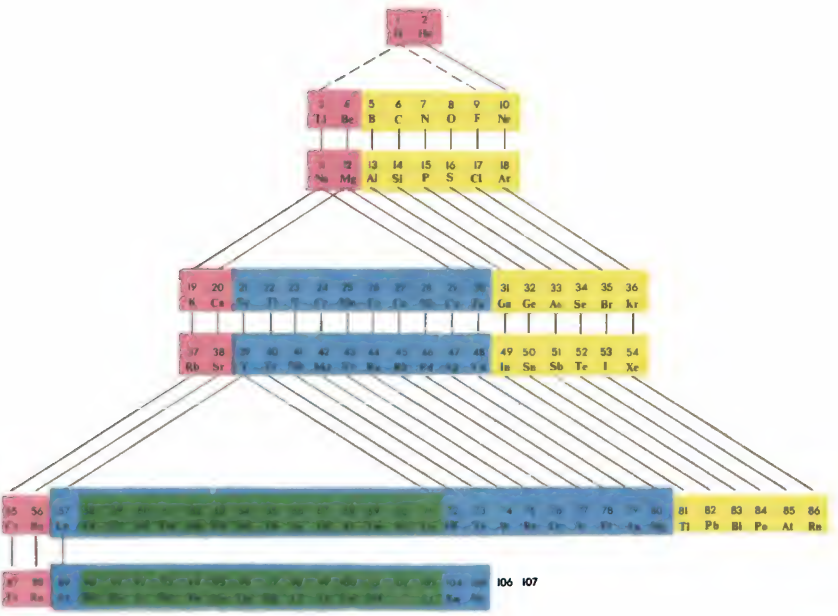
Значителен вклад Менделеева и в физику. В 1860 г. ученый впервые установил существование критической температуры, т. е. такой температуры, при которой *жидкость* — вне зависимости от *давления* — перестает отличаться от *газа*. Значение этого открытия было осмыслено далеко не сразу. В наши же дни изучение критических явлений превратилось в одно из самых актуальных направлений физики.

Д. И. Менделеев — один из создателей основного для молекулярной физики уравнения состояния идеального газа (см. *Газы*), ему принадлежит большое число работ по физическим свойствам реальных *газов* и *жидкостей*.

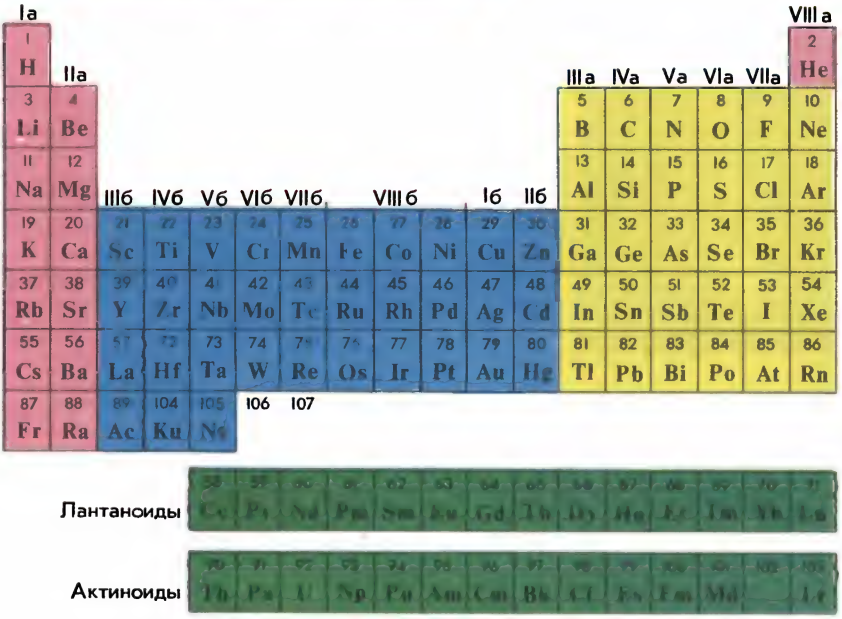
Во время происходивших в 1890 г. студенческих волнений у Менделеева возник острый конфликт с министром просвещения, и он покинул Петербургский университет. В 1892 г. Менделеев возглавил Главную палату мер и весов. На этом посту он выполнил множество важнейших работ по физической метрологии: построил точную теорию весов, разработал приемы прецизионного (точного) взвешивания, развил новую методику определения твердости материалов, подготовил введение в нашей стране метрической системы мер.

Химики всего мира чтут Д. И. Менделеева как выдающегося классика своей науки. Физики же, со своей стороны, тоже внесли важный вклад в увековечение его имени: в 1955 г. синтезированный американскими учеными 101-й элемент периодической системы был назван ими менделевием.

Лестничная форма таблицы Менделеева.



Длинная форма таблицы Менделеева.



Существенная особенность периодического закона заключается в том, что в отличие от многих других основных законов природы он не имеет количественного выражения, т. е. не может быть записан в виде какого-либо математического уравнения или формулы. Он нашел наглядное отражение лишь в виде периодической системы химических элементов.

Периодическая система как наглядное графическое выражение периодического закона может быть представлена в виде таблиц или различных геометрических фигур и математических кривых. За 100 с лишним лет существования учения о периодичности разными авторами предлагалось более 500 вариантов графического изображения периодической системы. Сейчас используются главным образом табличные варианты. Среди них наиболее часто встречается так называемая короткая форма таблицы (см. цветную вклейку, с. 208—209); она содержит максимум информации. Также находят применение длинная и лестничная формы таблиц (см. рис.).

К числу нерешенных проблем периодической системы, относящихся к области химии, принадлежат следующие: 1) водород оказывается единственным элементом, не имеющим определенного места в системе (его нельзя считать прямым аналогом ни щелочных металлов, ни галогенов); 2) не все ученые согласны с размещением редкоземельных элементов с $Z = 57 - 71$ в одной клетке с лантаном; 3) возникает вопрос о том, помещать инертные газы в VIII группу или сохранить на ними нулевую;

4) существуют разные точки зрения о размещении элементов с $Z > 89$, т. е. тория, протактиния, урана и *трансурановых элементов*. То, что мы видим на цветной вклейке,— это лишь наиболее употребительные варианты решения перечисленных проблем.

ПЛАВЛЕНИЕ

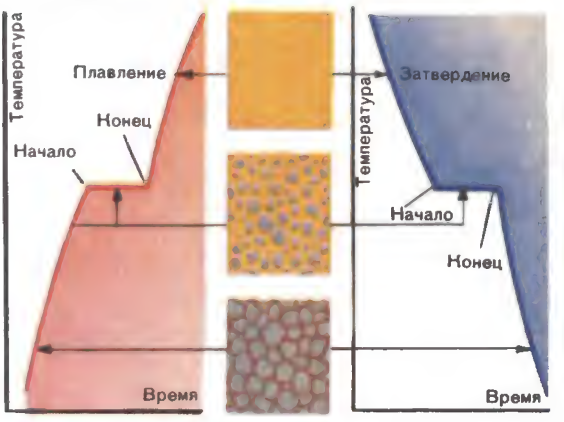
Плавление — это переход вещества из твердого состояния в жидкое. Этот процесс происходит при нагревании. Например, легкоплавкий металл свинец переходит из твердого состояния в жидкое, если его нагреть до 600 К или до 327° С. Свинец можно без труда расплавить на газовой плите в ложке, сделанной из нержавеющей стали.

Если, нагревая свинец, все время измерять его температуру, то мы обнаружим, что температура вначале плавно возрастает, но начиная с некоторого момента остается постоянной, несмотря на дальнейшее нагревание. Этот момент соответствует плавлению. Температура останется постоянной, пока весь свинец не расплавится, и только после этого начнет повышаться снова. При охлаждении жидкого свинца наблюдается обратная картина: температура падает до начала затвердевания, остается постоянной, пока свинец полностью не затвердеет, и затем понижается снова.

Аналогичным образом ведут себя все чистые вещества. Постоянство температуры при плавлении имеет большое практическое значение, поскольку позволяет градуировать термометры, приготовлять плавкие индикаторы и предохранители, которые расплавляются при строго заданной температуре.

Температура плавления и равная ей температура затвердевания — характерный признак вещества. Вот некоторые числа. При охлаждении водород затвердевает при атмосферном давлении при 13 К, ртуть — при 234 К, вода — при 273 К, олово — при 505 К, цинк — при 692 К, серебро — при 1235 К, железо — при 1812 К. Самыми тугоплавкими из простых веществ являются углерод (4020 К), вольфрам (3660 К) и рений (3450 К).

Что же происходит при плавлении? Очевидно, нарушается порядок в расположении *атомов* — пространственная кристаллическая решетка,— существующий в твердом состоянии. В кристалле атомы колеблются около своих положений равновесия. С повышением температуры амплитуда колебаний возрастает и достигает некоторой критической величины, после чего решетка разрушается. Для этого требуется дополнительная тепловая энергия, поэтому в процессе плавления температура не повышается, хотя тепло продолжает поступать. Необходимое для плавления количество тепла называется теплотой плавления. Величины теплот плавления сильно различаются для разных веществ. Так, чтобы расплавить 1 кг свинца, надо сообщить ему 24,7 кДж, а 1 кг меди — почти в 10 раз больше, 205,0 кДж.



Кривые нагрева и охлаждения для чистых веществ имеют горизонтальный участок, соответствующий плавлению или затвердеванию. Тепло, поступающее или выделяющееся при этой температуре, меняет характер теплового движения атомов, но температура остается постоянной.

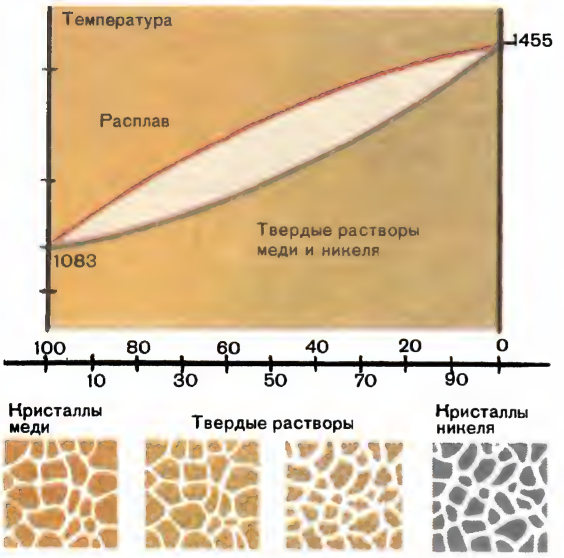
Температура плавления, подобно температуре *кипения*, зависит от *давления*. Для веществ, у которых объем при плавлении возрастает (а таких — подавляющее большинство), повышение давления повышает температуру плавления, и наоборот. У воды объем при плавлении уменьшается (поэтому, замерзая, вода разрывает трубы), и при повышении давления лед плавится при более низкой температуре. Аналогичным образом ведут себя висмут, галлий, некоторые марки чугунов.

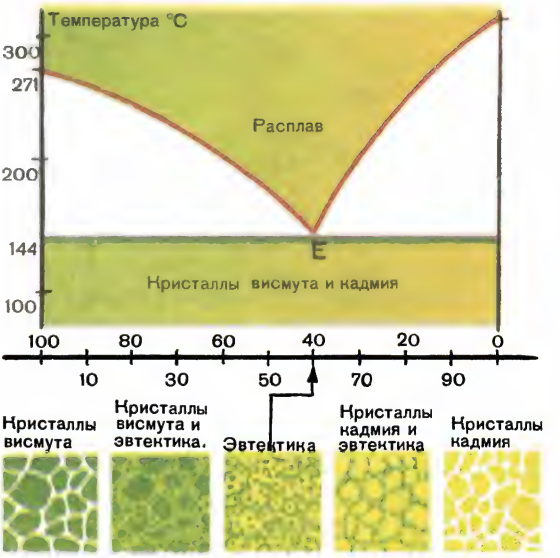
При затвердевании атомы вновь выстраиваются в определенном порядке и выделяется теплота затвердевания. Затвердевание в расплаве начинается, как правило, сразу во многих точках. Возникает и одновременно растет много кристаллов. Вначале они не мешают друг другу, а затем начинают сталкиваться. В результате образующееся твердое тело состоит из большого числа кристалликов, является поликристаллом. Существуют методы выращивания из расплава отдельных крупных кристаллов — монокристаллов.

Для сплавов, или, как говорят, бинарных (т. е. состоящих из двух веществ) и многокомпонентных систем, температура плавления зависит от концентрации растворенного вещества. Для изучения плавления сплавов оказалось удобным строить кривые нагрева и охлаждения, представляющие собой зависимость температуры от времени нагрева или охлаждения. Если для чистых веществ на таких кривых имеется только горизонтальный участок при температуре плавления, то для бинарных систем кривые имеют более сложный вид. На них в зависимости от состава наряду с гори-

Сплавы меди с никелем плавятся и затвердевают в некотором интервале температур. На рисунке он ограничен двумя линиями, соединяющими температуры плавления чистых меди и никеля. Между линиями находится область сосуществования расплава и твердого раствора. В нижней части рисунка изображено, как выглядит твердый раствор.

Висмут и кадмий не растворяются друг в друге в твердом состоянии, а образуют механическую смесь кристалликов — эвтектику. Сплав эвтектического состава — 60% (по массе) висмута и 40% кадмия — плавится при постоянной температуре 144° С.





зонтальными появляются участки с большей или меньшей крутизной, перегибы и т. д. Например, ход кривой охлаждения изменяется, когда из расплава начинают расти твердые кристаллы. Заметим также, что в таких системах состав твердых кристаллов не совпадает, как правило, с составом расплава.

Используя кривые нагрева и охлаждения, исследователи строят так называемые диаграммы фазового равновесия (см. *Фазовые превращения*) или диаграммы состояния, на которых по оси абсцисс отложено уже не время, а содержание элементов.

В настоящее время такие диаграммы построены для очень многих сплавов, особенно металлических. Примером может служить диаграмма состояния системы медь — никель. Медь и никель соединяются в любых пропорциях, как в жидком, так и в твердом состоянии, образуя в последнем твердый раствор замещения. Это значит, что атомы никеля способны заместить в кристаллической решетке все атомы меди. Температура плавления меди составляет 1083° С, никеля — 1445° С. Как видно из диаграммы состояния, построенной для сплавов меди с никелем, они плавятся и затвердевают не при одной какой-то определенной температуре, а в некотором температурном интервале, в пределах которого сосуществуют и твердый металл, и расплав. На диаграмме этот интервал ограничен двумя линиями, соединяющими температуры плавления чистых меди и никеля: верхняя линия обозначает конец расплавления при нагреве или начало затвердевания при охлаждении, нижняя — соответственно начало плавления или конец затвердевания. Таким образом, диаграмма разделяется на три области. Область существования жидкого расплава лежит выше верхней линии, а область существования кристаллических твердых растворов — ниже нижней. Между линиями находится область сосуществования расплава и твердого раствора. Верхнюю линию называют линией ликвидуса, а нижнюю — линией солидуса (в переводе с латинского «ликвидус» — «жидкий», «солидус» — «твердый»).

Совсем иной вид имеет диаграмма состояния висмут — кадмий. Эти металлы не растворяются друг в друге в твердом состоянии, а образуют механические смеси кристалликов висмута и кристалликов кадмия. Область существования расплава в этой системе ограничена снизу ломаной линией ликвидуса, соединяющей температуры плавления висмута и кадмия с точкой *E*. Точка *E* указывает температуру плавления сплава, содержащего 60% (по массе) висмута и 40% кадмия. Это единственный из сплавов висмута с кадмием, плавящийся при постоянной температуре T_E. Все остальные сплавы плавятся и затвердевают в пределах температурного интервала, который сверху ограничен линией ликвидуса, а снизу — горизонтальной линией солидуса, проходящей через точку *E*. Сплав, затвердевающий при постоянной температуре, называется эвтектическим; он состоит из очень мелких кристаллов кадмия и висмута.

Обратите внимание на то, что температура плавления и затвердевания этого сплава (144° С) гораздо ниже, чем чистых кадмия (321° С) и висмута (271° С). Такое положение характерно для всех систем, содержащих эвтектическую точку (греческое слово «эвтектос»

означает «легко плавящийся»). Например, эвтектический сплав из 56,5% висмута и 43,5% свинца плавится уже при 125° С, хотя температура плавления свинца составляет 327° С. Сплав Вуда (50% висмута, 25% свинца и по 12,5% олова и кадмия) плавится при 68,0° С, а сплав ртути с 8,5% галлия — при 60° С.

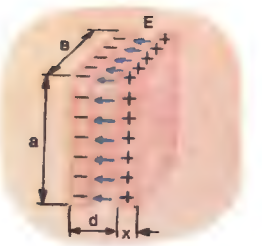
Диаграммы состояния дают нам важные сведения о строении сплавов и их поведении при нагреве и охлаждении, плавлении и затвердевании, но они соответствуют действительности, только если сплав находится в состоянии *теплового равновесия*. Такое состояние возникает, если все процессы совершаются очень медленно.

ПЛАЗМА

При нагревании вещества с ростом кинетической энергии движения его отдельных частиц происходит разрушение его структуры: *твердое тело* превращается в *жидкость*, жидкость — в *газ*. При еще большем нагреве кинетическая энергия самых быстрых *молекул* становится сравнимой с энергией связи *электронов* в *атомах*, и начинается *ионизация* газа. Вещество переходит в плазменное состояние. Но не всякую совокупность ионов и электронов принято называть плазмой. Если взять облачко ионизированного газа и извлечь из него один электрон, то облачко зарядится положительно. Извлечь из него следующий электрон будет уже труднее. Однако заряженные частицы могут и самопроизвольно вылетать из облачка, если работа против электрического поля, которую нужно при этом совершить, меньше, чем тепловая энергия частицы. Итак, в ионизированном газе возможно самопроизвольное разделение зарядов.

Плазмой принято называть такой ионизированный газ, в котором электростатическое взаимодействие между частицами столь велико, что самопроизвольное разделение зарядов может происходить лишь в областях пространства, очень малых по сравнению с размерами самого облака. Размер области, в которой возможно разделение зарядов, нетрудно оценить.

Сделаем простой мысленный эксперимент. Рассмотрим облачко ионизированного газа, состоящее из равного количества *протонов* и *электронов* с одинаковой температурой T и имеющее форму параллелепипеда со сторонами a, b и d ($a \approx b \gg d$) (см. рис.). Представим себе, что мы каким-то чудом сдвинули все ионы относительно электронов на расстояние x вдоль стороны d ($x \ll d$). При этом на боковых гранях параллелепипеда образуются два слоя разноименных зарядов — как



Мысленный эксперимент по разделению зарядов в плазме. Энергия электростатического поля «конденсатора», который образуется при таком разделении, не может превышать энергию частиц, находившихся в объеме конденсатора до разделения зарядов.

бы две обкладки плоского конденсатора с площадью пластин $S = a \cdot b$ и расстоянием между ними d. Емкость такого конденсатора $C = S\varepsilon_0/d$. Заряд на каждой обкладке q равен полному числу заряженных частиц одного знака в слое толщиной x, и если плотность электронов равна n, а заряд каждого e, то $q = e \cdot n \cdot S \cdot x$. Соответственно разность потенциалов между обкладками будет $U = q/C = \frac{nedx}{\varepsilon_0}$.

Такой конденсатор обладает определенной энергией, заключенной в его электрическом поле, $W_E = q^2/2C$. Поэтому самопроизвольно, т. е. за счет движения частиц, такое разделение зарядов могло бы произойти только в том случае, если электростатическая энергия конденсатора не превышает полной тепловой энергии всех частиц, заключенных в его объеме: $W_т = 2 \cdot n \cdot S \cdot d \cdot \frac{3}{2} kT$ (k — постоянная Больцмана). Таким образом, *закон сохранения энергии* позволяет оценить возможный масштаб максимального самопроизвольного разделения зарядов:

$$x < \sqrt{\frac{3\varepsilon_0 CT}{ne^2}}.$$

Более точный расчет дает:

$$x \leqslant D = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_0 CT}{ne^2}}.$$

Величину D называют дебаевским радиусом в честь физика П. Дебая, который впервые ввел это понятие при изучении физики электролитов.

На расстояниях, существенно больших дебаевского радиуса, значительное разделение зарядов в плазме невозможно, и ее можно считать квазинейтральной, т. е. суммарный заряд всех частиц в объемах, значительно больших D^3, с высокой точностью равен нулю. Если в плазму внести заряд извне, то его поле вызовет смещение плазменных частиц: частицы того же знака удалятся от данного заряда, а частицы с противоположным знаком заряда приблизятся. Произойдет то, что называют поляризацией. В результате поле внесенного заряда будет заэкранировано плазмой и исчезнет на расстоянии порядка дебаевского радиуса. Из-за поляризации потенциал отдельного заряда в плазме описывается не законом Кулона ($\varphi = q/r$),

Древние греки полагали, что существуют четыре первоосновы материи: земля, вода, воздух, огонь. Можно сказать, что тем самым они как бы предвосхитили представления современной науки о четырех состояниях вещества: твердом, жидком, газообразном и плазменном. В наши дни человек активно исследует плазму и широко использует ее в раз-

$\varphi = q/4\pi\varepsilon_0 r$, а более сложным соотношением: $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r} \cdot e^{-r/D}$, где D — дебаевский радиус. Совершенно очевидно, что в качестве такого пробного заряда можно рассматривать любой заряд самой плазмы: его поле экранируется в плазме на расстоянии дебаевского радиуса.

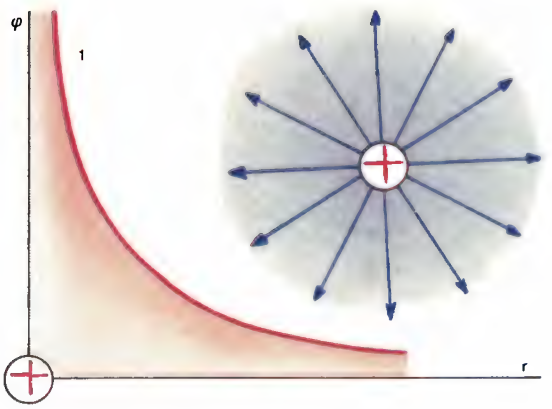
Если же разделение зарядов в плазме по каким-то причинам произошло, то возникающее электрическое поле будет стремиться устранить его. Вернемся к нашему плоскому конденсатору. Электрическое поле E внутри него равно $\frac{nex}{\varepsilon_0}$. Сила, действующая на электроны (движением ионов можно пренебречь из-за их большой массы), равна eE и пропорциональна расстоянию между зарядами x. Движение электронов под действием этой силы будет происходить так же, как происходит движение массы m_e, закрепленной на пружине с жесткостью $\frac{eE}{x} = \frac{ne^2}{\varepsilon_0}$, т. е. электроны начнут колебаться относительно положения равновесия с частотой $\omega = \sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m_e}}$. Эту частоту называют плазменной (или ленгмюровской, по имени американского физика И. Ленгмюра, открывшего это явление), а сами колебания — плазменными.

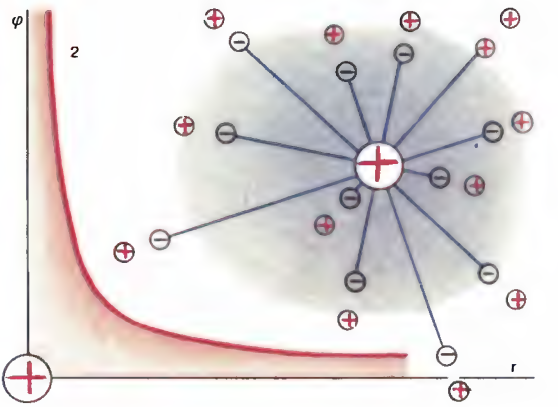
Плазма вообще отличается богатством форм колебательного движения. В ней кроме упомянутых выше плазменных колебаний возможны и свойственные газу продольные звуко-

личных приборах, устройствах, системах. Плазма встречается нам всюду, где используется электрический разряд в газе. Она является «рабочим телом» многих типов лазеров, МГД-генераторов, плазменных двигателей.

вые волны (см. *Звук*), и поперечные *электромагнитные волны*, похожие на радиоволны, и свет, а также различные сочетания электромагнитных и механических колебаний. Особенно богаты и интересны свойства плазмы, помещенной в магнитное поле. Так как плазма состоит из заряженных частиц, последние не могут свободно перемещаться поперек силовых линий магнитного поля и движутся по винтовым траекториям, навивающимся на силовые линии. Поэтому свойства плазмы становятся анизотропными, т. е. неодинаковыми в разных направлениях: электропроводность, теплопроводность, распространение волн сильно отли-

Электрический потенциал заряда в вакууме (*1*) и в плазме (*2*). Поле заряда экранируется на дебаевском радиусе (*r*).





Взаимодействие «резонансных» частиц с волной приводит к ее затуханию, если частиц,

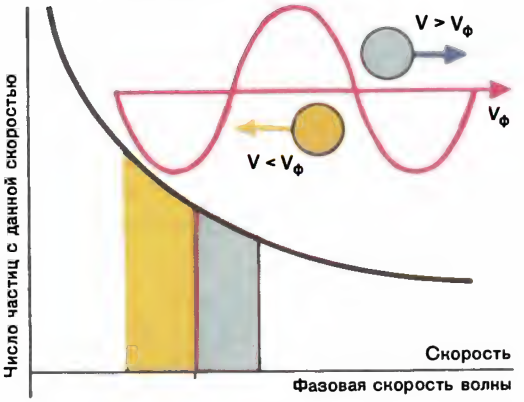
чаются для направлений вдоль и поперек магнитного поля. Перенос энергии и вещества поперек магнитного поля оказывается сильно подавленным. На этом эффекте и основаны все надежды на удержание горячей плазмы в магнитном поле (см. *Термоядерный синтез*).

В отличие от газа, где каждая частица «узнает» о существовании себе подобных лишь в моменты столкновений, в плазме каждая частица непрерывно ощущает воздействие «соседей», в совокупном электромагнитном поле которых она постоянно находится. Поэтому ее траектория движения представляет собой не ломаную линию, как траектория молекулы газа, а плавно изгибающуюся кривую. Изменения траектории частицы при ее взаимодействии с электрическими полями других частиц быстро уменьшаются с увеличением энергии частицы. Поэтому при высоких температурах плазмы воздействие частиц друг на друга становится несущественным, и они движутся как бы в отсутствие столкновений. В этих условиях колебания, возникающие в горячей плазме, должны были бы иметь очень малое затухание, если бы не существовал особый эффект, открытый советским ученым Л. Д. Ландау и названный поэтому затуханием Ландау.

Попытаемся понять, что это такое (см. рис.). Пусть в плазме существует волна электрического поля, распространяющаяся с некоторой фазовой скоростью $V_ф$ и имеющая частоту ω. Тогда для частиц, движущихся в ту же сторону, что и волна, и с той же скоростью (такие частицы принято называть резонансными), из-за *эффекта Доплера* частота колебаний равна нулю. Они тормозятся или ускоряются постоянным электрическим полем, отдавая свою энергию волне или отнимая у нее энергию. Для всех других, «нерезонансных» частиц обмен энергией с волной имеет периодический характер и в среднем по времени равен нулю. Будут ли частицы увеличивать энергию волны или, напротив, отнимать энергию у волны и вызывать ее затухание, зависит от того, каких частиц больше: двигающихся чуть-чуть быстрее волны (они отдают энергию волне) или чуть-чуть медленнее (они вызывают затухание волны). В плазме с равновесным (тепловым) распределением частиц по скоростям более быстрых частиц всегда меньше, чем более медленных, и поэтому волны затухают. В термодинамически неравновесной плазме (а такая плазма нередко получается в экспериментах по *термоядерному синтезу*) более быстрых частиц может быть больше, чем медленных, в определенном диапазоне скоростей, и волны, чьи фазовые скорости попадают в этот диапазон, могут раскачиваться резонансными частицами. Этот эффект (его называют обратным затуханием Ландау) служит причиной многих неустойчивостей (самопроизвольного возникновения колебаний) в горячей неравновесной плазме.

Из-за слабого взаимодействия между заряженными частицами при высоких энергиях частиц термодинамическое равновесие в горячей плазме устанавливается медленно. Этот процесс еще больше замедляется из-за того факта, что плазма как бы состоит из двух газов: ионов и *электронов*. Электроны много легче ионов, и обмен энергии происходит между ними очень медленно: при столкновении электрона с ионом электрону крайне трудно отдать свою энергию. Так, пинг-понговый шарик отскакивает от стола практически без потери энергии. По законам сохранения энергии и импульса, даже при столкновении электрона с легчайшим из ионов — *протоном* — электрон может передать последнему не более $\frac{4m_e}{m_p} = 1/460$ своей энергии. Поэтому при нагревании плазмы электрическим током, когда основная энергия передается электронам, температуры электронов и ионов плазмы могут быть существенно различными. Именно благодаря этому эффекту можно получить плазму с горячими электронами (их температура достигает десятки ты-

которые движутся чуть-чуть медленнее волны (синие шарики), больше, чем частиц, движущихся чуть-чуть быстрее волны (желтые шарики).



сяч градусов) в стеклянной трубке газоразрядной лампы. Ионы при этом остаются холодными — их температура не превышает температуры стенки стеклянной трубки.

На поверхности Земли в естественных условиях плазма — «редкий гость», появляющийся лишь при вспышках молний. Высоко над поверхностью Земли находится область слабо ионизированной плазмы, называемая *ионосферой*. Ионизация газа происходит здесь под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Степенью ионизации плазмы называют отношение плотности заряженных частиц к полной плотности частиц в плазме. Если это отношение порядка 1% и менее, то *плазму* называют слабо ионизированной. С движением вверх степень ионизации повышается. В космосе плазма становится уже основным состоянием вещества: она образует звезды и облака межзвездного ионизированного газа. Без знания законов физики плазмы невозможно понять эволюцию звезд и развитие нашей Вселенной (см. *Астрофизика, Космология*).

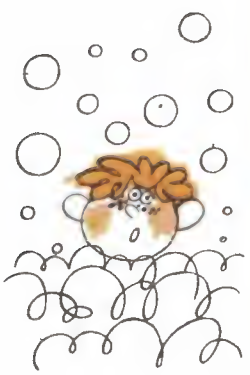
В лабораторных условиях плазма впервые появилась в виде газового разряда. Она заполняет лампы дневного света, стеклянные трубки неоновой рекламы, работает в лампах-вспышках, мигающих на крыльях самолетов и мачтах кораблей. За последние годы применение плазмы существенно расширилось. Сегодня плазма — это не только лампа-вспышка для накачки рубинового *лазера*, но и основное рабочее тело огромного семейства газовых лазеров. Химические реакции в плазме используются для получения химических соединений, которые нельзя получить в других условиях, например соединений инертных газов. За последнее десятилетие возникла даже новая наука, исследующая такие реакции, — плазмохимия.

Плазму используют как резец при плазменной резке и как шлифовальный камень при плазменной шлифовке и травлении поверхностей. Ионные пучки, получаемые с помощью плазменных источников, служат для введения малых добавок в *полупроводники* и конструирования интегральных схем, а плазменные струи — для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхности деталей. Плазма

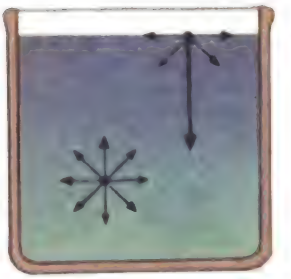
РАКЕТА

Тот факт, что коэффициенты *поверхностного натяжения* чистой и мыльной воды отличаются почти в 2 раза, позволяет на нескольких опытах проиллюстрировать модель: поверхность жидкости — натянутая пленка.

Вырежьте из бумаги ракету такой формы, как показано на первом рисунке. В точку A поместите маленький кусочек мыла. Если теперь опустить ракету на спокойную поверхность воды, то она начнет двигаться. Можно, используя тот же принцип, сделать вертушку в форме буквы S и поместить кусочек мыла в точках A и A_1 (второй рисунок).



используется в *МГД-генераторах* с целью преобразования тепловой энергии в электричество и в плазменных двигателях для ориентации и разгона космических кораблей и спутников. Но, конечно, основное будущее плазмы связано с той ролью, какую она призвана сыграть в решении одной из важнейших проблем нашего века — овладении энергией управляемого термоядерного синтеза.



Силы, действующие на молекулы на поверхности и внутри жидкости.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Поверхность *жидкости*, соприкасающейся с другой средой, например с ее собственным паром, находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Возникают эти условия потому, что на поверхности жидкости, вблизи границы, разделяющей жидкость и пар, *молекулы* испытывают иное молекулярное взаимодействие, чем молекулы, находящиеся внутри объема жидкости.

На каждую молекулу внутри жидкости действуют силы притяжения соседних молекул, окружающих ее со всех сторон (см. рис.). Равнодействующая этих сил равна нулю. Равнодействующая же сил притяжения, действующих на молекулы поверхностного слоя, не равна нулю (так как над поверхностью жидкости находится пар, плотность которого во много раз меньше, чем плотность жидкости) и направлена внутрь жидкости. Под действием этой силы молекулы поверхностного слоя стремятся втянуться внутрь жидкости, число молекул на поверхности уменьшается, и площадь поверхности сокращается. Но все молекулы, разумеется, не могут уйти вовнутрь. На поверхности остается такое число молекул, при котором площадь поверхности оказывается минимальной в каждом конкретном случае — при заданном объеме жидкости, силах, действующих на жидкость.

Для перенесения молекул из глубины объема жидкости в ее поверхностный слой необходимо совершить работу по преодолению равнодействующей сил притяжения, действующих на молекулу в поверхностном слое.

Поверхностным натяжением σ называется величина, равная *работе*, затраченной на увеличение поверхности жидкости на одну единицу (при постоянной температуре): $\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S}$. Единицей поверхностного натяжения в СИ является 1 Дж/м^2.

Если поверхность жидкости ограничена периметром смачивания, то поверхностное натяжение σ можно рассматривать как силу, действующую на единицу длины периметра смачивания и направленную перпендикулярно к этому периметру: $\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l}$.

В данном случае единицей поверхностного натяжения в СИ будет 1 Н/м, что не противоречит уже названной единице:

$$1\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}^2} = 1\frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Поверхностное натяжение зависит от рода жидкости и от ее *температуры*: с повышением температуры оно уменьшается. Так называемые поверхностно-активные вещества (мыло, жирные кислоты) также уменьшают поверхностное натяжение.

Для экспериментального определения значения поверхностного натяжения жидкости можно использовать процесс образования и отрыва капель, вытекающих из капельницы. Пока капля мала, она не отрывается, ее удерживают силы поверхностного натяжения. Отрыв капли происходит в тот момент, когда ее вес P становится равным равнодействующей сил поверхностного натяжения, действующих вдоль окружности шейки капли. Приближенно диаметр шейки капли принимают равным диаметру трубки капельницы. Поэтому можно записать: $P = \pi D\sigma$. Отсюда $\sigma = \frac{P}{\pi D}$.

Удивительно разнообразны проявления поверхностного натяжения жидкости в природе и технике. Оно собирает воду в капли и позволяет жуку-водомерке скользить по воде; благодаря ему можно выдуть мыльный пузырь и писать ручкой. Действие сил поверхностного

ОПЫТ ПЛАТО

Компенсируя вес капли жидкости, помещенной в другую жидкость (если они не смешиваются), за счет архимедовой силы выталкивания, можно повторить опыт бельгийского ученого XIX в. Жозефа Плато́.

В пробирку, наполненную касторовым маслом, накапайте пипеткой воды. Масло имеет плотность 0,97 г/см^3, и капля воды, медленно опускаясь, находится в нем практически в невесомости. Под действием сил поверхностного натяжения она принимает форму шара. Капли воды легко окрасить в разные цвета акварельными красками.

натяжения приводит к тому, что в состоянии невесомости любой объем жидкости принимает строго сферическую форму; это неоднократно демонстрировали телезрителям космонавты в телерепортажах с космических станций.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники — класс веществ, занимающий промежуточное положение между веществами, хорошо проводящими электрический ток (проводники, в основном *металлы*), и веществами, практически не проводящими электрического тока (изоляторы или *диэлектрики*).

Для полупроводников характерна сильная зависимость их свойств и характеристик от микроскопических количеств содержащихся в них примесей. Изменяя количество примеси в полупроводнике от десятимиллионных долей процента до 0,1 — 1%, можно изменять их проводимость в миллионы раз. Другое важнейшее свойство полупроводников состоит в том, что электрический ток переносится в них не только отрицательными зарядами — *электронами*, но и равными им по величине положительными зарядами — дырками.

Если рассматривать идеализированный полупроводниковый кристалл, абсолютно свободный от каких-либо примесей, то его способность проводить электрический ток будет определяться так называемой собственной электропроводностью.

Атомы в кристалле полупроводника связаны между собой с помощью электронов внешней электронной оболочки. При тепловых колебаниях атомов тепловая энергия распределяется между электронами, образующими связи, неравномерно. Отдельные электроны могут получать количество тепловой энергии, достаточное для того, чтобы «оторваться» от своего атома и получить возможность свободно перемещаться в кристалле, т. е. стать потенциальными носителями тока (по-другому можно сказать, что они переходят в зону *проводимости*, см. *Твердое тело.*). Такой уход электрона нарушает электрическую нейтральность атома, у него возникает положительный заряд, равный по величине заряду ушедшего электрона. Это вакантное место называют дыркой.

Так как вакантное место может быть занято электроном соседней связи, дырка также может перемещаться внутри кристалла и являться

АБРАМ ФЕДОРОВИЧ ИОФФЕ (1880 — 1960)

Советский физик, академик Абрам Федорович Иоффе родился в городе Ромны. В 1902 г. он окончил Петербургский технологический институт, а в 1905 г. — Мюнхенский университет. В 1903—1906 гг. работал ассистентом у знаменитого немецкого физика В. Рентгена. В его лаборатории А. Ф. Иоффе сделал крупное открытие — обнаружил внутренний *фотоэффект* в кристаллах *диэлектриков*. Вернувшись в 1906 г. в Россию, он стал преподавателем в Петербургском политехническом институте.

А. Ф. Иоффе совершенно по-новому поставил вопрос о подготовке физиков в России. Вместо традиционного повторения работ, выполненных иностранными учеными, он добивался от своих учеников оригинальных самостоятельных исследований, открытия и изучения новых физических явлений. Важнейшая заслуга Иоффе — создание научной школы советских физиков, из которой вышли многие ученые.

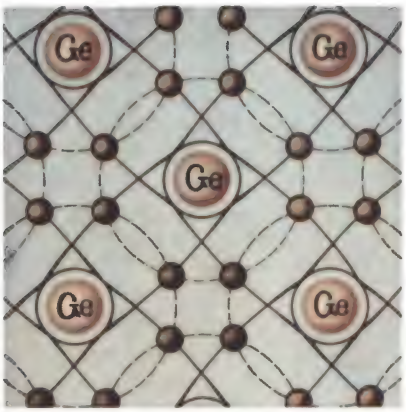
В 1921 г. он создал и долгие годы возглавлял Физико-технический институт Академии наук СССР. По его инициативе были созданы Институт полупроводников и Физико-агрономический институт, физико-технические институты в Харькове, Днепропетровске, Свердловске, Томске.

А. Ф. Иоффе провел важные исследования в области физики *твердого тела*. Он первый применил *рентгеновские лучи* для исследования механизма пластической деформации монокристаллов, обнаружив скольжение разных слоев кристаллической решетки относительно друг друга. Ему принадлежат классические опыты, демонстрирующие важную роль поверхностных дефектов кристаллов (микроскопических трещинок) в процессах хрупкого разрушения кристаллических тел. Эти опыты способствовали разработке высокопрочных материалов.

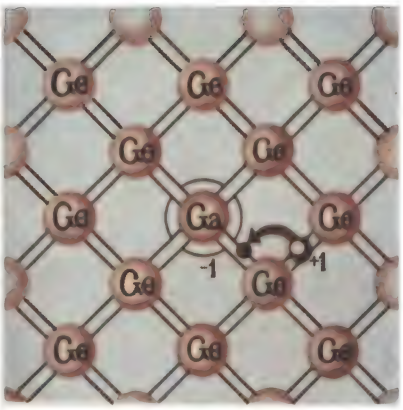
Иоффе одним из первых обратил внимание на необходимость изучения полупроводников как новых материалов для электроники и всесторонне исследовал их свойства. Эти работы положили начало развитию новых областей полупроводниковой техники — термо- и фотоэлектрических генераторов и термоэлектрических холодильных устройств.

А. Ф. Иоффе — Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственной премий.

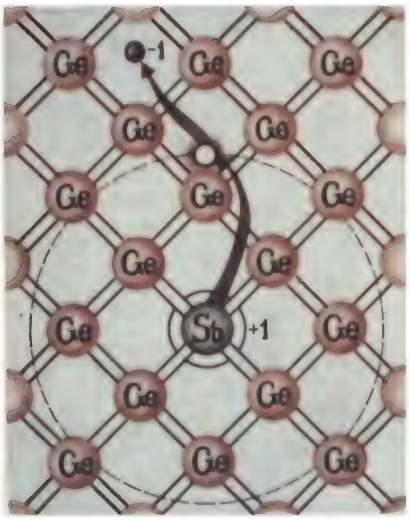
Атомы в кристалле германия или кремния располагаются упорядоченно на таких расстояниях друг от друга, что их внешние электронные оболочки перекрываются. У электронов соседних атомов появляются общие орбиты. Так образуются ковалентные связи.



Вводя в германий в качестве примеси химические элементы III группы периодической системы, можно повысить концентрацию дырок в кристалле и уменьшить концентрацию электронов.



Увеличение содержания атомов сурьмы (V группа) в германии приводит к увеличению в нем свободных электронов, которые становятся основными носителями заряда, а дырки — неосновными.



уже положительным носителем тока. Естественно, что электроны и дырки при этих условиях возникают в равных количествах, и электропроводность такого идеального кристалла будет в равной степени определяться как положительными, так и отрицательными зарядами.

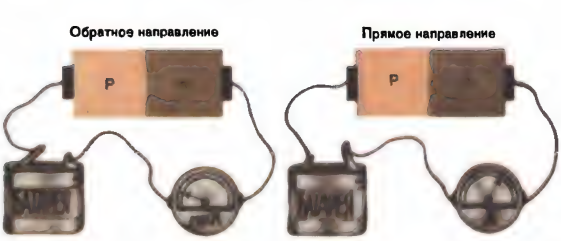
Если на место атома основного полупроводника поместить атом примеси, во внешней электронной оболочке которого содержится на один электрон больше, чем у атома основного полупроводника, то такой электрон окажется как бы лишним, ненужным для образования межатомных связей в кристалле и слабо связанным со своим атомом. Достаточно в десятки раз меньшей энергии, чтобы оторвать его от своего атома и превратить в свободный электрон. Такие примеси называют д о н о р н ы м и п р и м е с я м и, т. е. отдающими «лишний» электрон. Атом примеси заряжается, разумеется, положительно, но дырки при этом не появляется, так как дыркой может быть только вакансия электрона в незаполненной межатомной связи, а в данном случае все связи заполнены. Этот положительный заряд остается связанным со своим атомом, неподвижным и, следовательно, в процессе электропроводности участия принимать не может.

Введение в полупроводник примесей, внешняя электронная оболочка которых содержит меньшее количество электронов, чем в атомах основного вещества, приводит к появлению незаполненных связей, т. е. дырок. Как было сказано выше, эта вакансия может быть занята электроном из соседней связи, и дырка получает возможность свободного перемещения по кристаллу. Иными словами, движение дырки — это последовательный переход электронов из одной соседней связи в другую. Такие п р и м е с и, «принимающие» электрон, называют а к ц е п т о р н ы м и.

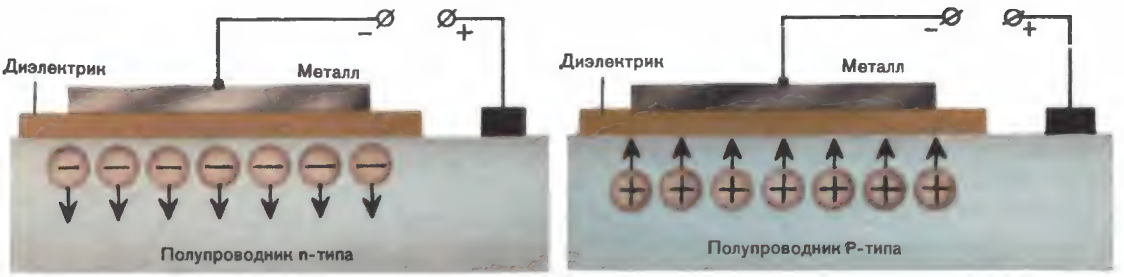
С увеличением количества примесей того или иного типа электропроводность кристалла начинает приобретать все более ярко выраженный электронный или дырочный характер. В соответствии с первыми буквами латинских слов negativ и positiv электронную электропроводность называют электропроводностью *n*-типа, а дырочную — *p*-типа, отмечая этим, какой тип подвижных носителей заряда для данного полупроводника является основным, а какой — неосновным.

При электропроводности, обусловленной наличием примесей (т. е. примесной), в кристалле по-прежнему остается два типа носителей: основные, появляющиеся главным образом за счет введения в полупроводник при-

Одно из главных свойств *p*-перехода состоит в его способности пропускать электрический ток в одном (прямом) направлении в тысячи и миллионы раз лучше, чем в обратном.



Если приложить к структуре металл — диэлектрик полупроводник *n*-типа напряжения (указанной на рисунке полярности), то в приповерхностном слое полупроводника возникает электрическое поле, отталкивающее электроны. Этот слой оказывается обедненным электронами и будет обладать более высоким сопротивлением. При изменении полярности напряжения электроны будут притягиваться электрическим полем и у поверхности создастся обогащенный слой с пониженным сопротивлением. В полупроводнике *p*-типа, где основными носителями являются положительные заряды — дырки, та полярность напряжения, которая отталкивала электроны, будет притягивать дырки и создавать обогащенный слой с пониженным сопротивлением. Смена полярности в этом случае приведет к отталкиванию дырок и образованию приповерхностного слоя с повышенным сопротивлением.



месей, и неосновные, обязанные своим появлением тепловому возбуждению. Следует отметить, что содержание в 1 см^3 (концентрация) электронов n и дырок p для данного полупроводника при данной температуре есть величина постоянная:

$$n \cdot p = \text{const}.$$

Это значит, что, увеличивая за счет введения примесей в несколько раз концентрацию носителей данного типа, мы во столько же раз уменьшаем концентрацию носителей другого типа.

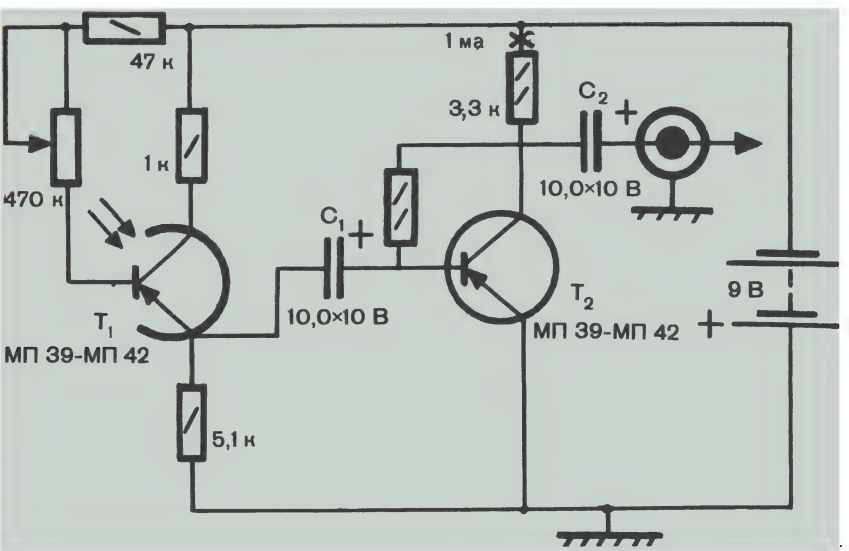
Следующее важное свойство полупроводников, вытекающее из вышеизложенного, — их сильная чувствительность к температуре и облучению. С ростом *температуры* повышает-

ФОТОТРАНЗИСТОР

Среди множества полупроводниковых приборов, которые можно сделать самостоятельно, рассмотрим фототранзистор. В нем используется то, что под действием света сопротивление полупроводников уменьшается. Сделать фототранзистор можно следующим образом. У транзистора T_1 МП39 ÷ МП42 аккуратно спилить пилкой верхнюю часть корпуса и собрать схему, изображенную на рисунке. Транзистор T_2 также типа МП39 ÷ МП42 служит для предварительного усиления сигнала. Выход схемы надо соединить кабелем со входом усилителя низкой частоты от радиоприемника.

Усиленный сигнал преобразуется динамиком в звуковой. Сопротивление R_1 позволяет регулировать работу прибора. А в качестве источника света можно использовать электрический фонарик и линзу, фокусирующую пучок света на фототранзистор.

Если в темной комнате установить включенный фонарь против фототранзистора, а между ними поместить диск из картона с отверстиями, то, поворачивая диск, вы услышите серию щелчков. При достаточно большой скорости вращения диска (например, с помощью электромоторчика) щелчки сольются в непрерывный звук.



ся средняя энергия колебания атомов в кристалле, и все большее количество связей будет подвергаться разрыву. Будут появляться все новые и новые пары электронов и дырок. При достаточно высоких температурах собственная (тепловая) *проводимость* может сравняться с примесной или даже значительно превзойти ее. Чем выше концентрация примесей, тем при более высоких температурах будет наступать этот эффект.

Разрыв связей может осуществляться также за счет облучения полупроводника, например, светом, если энергия световых квантов достаточна для разрыва связей. Энергия разрыва связей у разных полупроводников различна, поэтому они по-разному реагируют на те или иные участки спектра облучения.

Эти важнейшие свойства полупроводников используются для создания самых различных по своему назначению и областям применения полупроводниковых приборов.

Первым полупроводниковым материалом, нашедшим свое практическое применение, был селен. В настоящее время чаще всего используют кремний, вытеснивший в значительной мере такой полупроводник, как германий. Селен, германий и кремний относятся к так называемым элементарным полупроводникам, т. е. к полупроводникам, являющимся элементами *периодической системы* Д. И. Менделеева.

Наряду с германием и кремнием все более широкое распространение начинают получать сложные соединения элементов III и V, II и IV, II и VI групп периодической системы, обладающие полупроводниковыми свойствами. Здесь следует упомянуть, например, соединения галлия и мышьяка (арсенид галлия), галлия и фосфора, кадмия, ртути и теллура и т. п. В качестве примесей используют бор, фосфор, индий, мышьяк, сурьму и многие другие элементы, сообщающие полупроводникам необходимые свойства. Типичные значения вводимых в полупроводник примесей заключены между десятыми и стотысячными долями процента.

Получение полупроводниковых кристаллов с правильной кристаллической решеткой (монокристаллов) и заданным содержанием и распределением строго контролируемых примесей представляет собой сложнейший технолсгический процесс, проводимый в особо чистых условиях с использованием оборудования высокой точности и сложности. Все описанные выше процессы могут быть объяснены также с помощью зонной теории, как это сделано, например, в статье *Проводимость*.

ПОЛЯ И ЧАСТИЦЫ

Как разнообразны волновые явления в природе! Даже на воде бывает много типов волн. *Волны* могут рождаться, сталкиваться, рассеиваться, подобно частицам. А может быть, и частицы — это волны, только, конечно, не в воде, а в какой-то невидимой среде?

Подобные мысли приходили людям в голову много раз в истории физики. Особенно жаркие споры разгорелись в XVII в. между сторонниками корпускулярной теории света, считавшими его потоком частиц, и сторонниками волновой теории, считавшими свет волнами в невидимом эфире. Кто же оказался прав? Никто, или, вернее, и те, и другие.

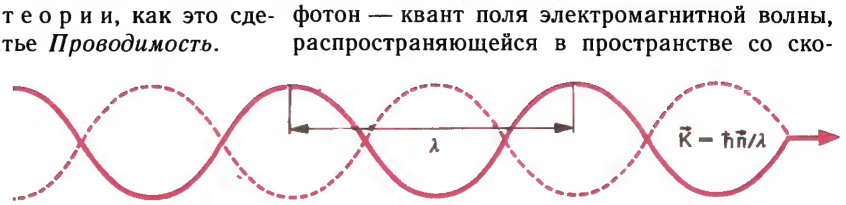
Действительно, свет — это поток частиц — квантов или *фотонов*, несущих определенные порции энергии и импульса. С другой стороны, свет — это волны электромагнитного поля (см. *Электромагнитные волны*), обладающие энергией и импульсом и распространяющиеся в пространстве со скоростью света.

Для того чтобы совместить эти два столь различных понятия — волна и частица,— пришлось пересмотреть ньютоновскую *механику*.

В *квантовой механике* любой частице соответствует волна. А когда частиц много? С точки зрения квантовой механики можно было бы сопоставить каждой частице свое поле. Скажем, можно было бы в принципе считать, что каждому *электрону* в пучке из ускорителя соответствует свое поле. Однако опыт свидетельствует о полной неразличимости тождественных частиц. Конечно, у электронов могут быть разные энергии и импульсы, но при одних и тех же параметрах электроны одинаковы.

Итак, если все частицы одинаковы, как волны в одной и той же среде, то, значит, эта среда, т. е. поле, является более фундаментальным понятием. В этом смысле сторонники теории эфира оказались ближе к истине.

Что же такое поле? С математической точки зрения поле — это произвольная функция или набор функций, координат $\vec{r} = x, y, z$ и времени t. Например, *фотон* описывается электрическим полем $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и магнитным полем $\vec{H}(\vec{r}, t)$, гармонически, т. е. синусоидально, зависящим от координат и времени. Очень важно, что электромагнитное поле фотона является гармонической функцией определенной комбинации пространственных координат и времени: $\vec{E}$ (или $\vec{H}$) $= \vec{E}(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$. Это означает, что фотон — квант поля электромагнитной волны, распространяющейся в пространстве со ско-

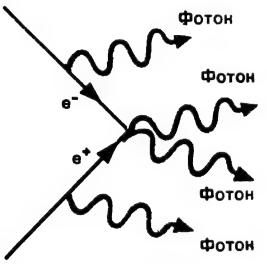


Волновой вектор направлен в сторону распространения электромагнитной волны.

ростью $\frac{\omega}{k} = c$ и характеризующейся длиной волны (деленной на 2π) $\lambda = \frac{1}{k}$. Здесь $\vec{k} = k\vec{n} = \frac{1}{\lambda}\vec{n}(\vec{n} = \frac{\vec{k}}{k}$ — единичный вектор, направленный в сторону распространения волны) носит название волнового вектора. Импульс фотона $\vec{p} = \hbar\vec{k} = \frac{\hbar\omega}{c}\cdot\vec{n}$, а его энергия $E = \hbar\omega$.

Кроме переменных полей в физике играют важную роль постоянные, так называемые статические электрические и магнитные поля, например магнитное поле Земли, электрическое поле в грозовой туче и т. д.

Все это разные формы проявления электромагнитного поля.



Аннигиляция позитрона и электрона с образованием фотона.

В природе известны и другие поля. Со времен Ньютона мы знаем гравитационное поле, создаваемое материальными телами. Гравитационное поле пропорционально энергии тела. Для покоящихся или медленно движущихся тел энергия совпадает с массой, умноженной на квадрат скорости света: $E = mc^2$, так что гравитационное поле пропорционально массе (закон Ньютона, см. *Тяготение*). Согласно общей *теории относительности*, гравитационное поле может зависеть от времени и распространяться со скоростью света.

Гравитационные волны пока экспериментально не обнаружены, поскольку они очень слабо взаимодействуют с веществом. Поиски их ведутся во многих лабораториях мира.

Электронам тоже соответствует поле — так называемое электронно-позитронное. Здесь возникает новое понятие — античастица (см. *Антивещество*). Одно и то же поле описывает как частицы (электроны), так и античастицы (позитроны). Частицы и античастицы в процессе аннигиляции превращаются в другие частицы, например *фотоны*. Возможен и обратный процесс — рождения электронно-позитронных пар электромагнитным полем. Все эти процессы описываются *квантовой электродинамикой*. В квантовой электродинамике электронно-позитронное поле связано с электромагнитным полем так, что энергия и импульс могут перетекать туда и обратно.

Это и соответствует рождению и аннигиляции пар.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Возвращавшиеся из Исландии моряки привозили необычные прозрачные кристаллы известкового шпата ($CaCO_3$), которые часто имели форму правильного ромбоэдра. В 1669 г. датский ученый Э. Бартолин сообщил о своих опытах с этими кристаллами. Он с удивлением обнаружил, что луч света при прохождении сквозь кристалл расщепляется на два луча (называемых теперь обыкновенным и необыкновенным). Бартолин провел тщательные исследования обнаруженного им явления двойного лучепреломления, однако объяснения ему дать не смог.

Через 20 лет после опытов Э. Бартолина его открытие привлекло к себе внимание нидерландского ученого Х. Гюйгенса. Он сам начал исследовать свойства кристаллов исландского шпата и дал объяснение явлению двойного лучепреломления на основе своей волновой теории света. При этом он ввел важное понятие оптической оси кристалла, при вращении вокруг которой отсутствует анизотропия свойств кристалла, т. е. их зависимость от направления (конечно, такой осью обладают далеко не все кристаллы).

В своих опытах Гюйгенс пошел дальше Бартолина, пропуская оба луча, вышедшие из кристалла исландского шпата, сквозь второй такой же кристалл. Оказалось, что если оптические оси обоих кристаллов параллельны, то дальнейшего разложения этих лучей уже не происходит. Если же второй ромбоэдр повернуть на 180° вокруг направления распространения обыкновенного луча, то при прохождении через второй кристалл необыкновенный луч претерпевает сдвиг в направлении, противоположном сдвигу в первом кристалле, и из такой системы оба луча выйдут соединенными в один пучок. Выяснилось также, что в зависимости от величины угла между оптическими осями кристаллов изменяется интенсивность обыкновенного и необыкновенного лучей.

Эти исследования вплотную подвели Гюйгенса к открытию явления *поляризации света*, однако решающего шага он сделать не смог, поскольку световые волны в его теории предполагались продольными. Для объяснения опытов Х. Гюйгенса И. Ньютон, придерживающийся корпускулярной теории света, выдви-

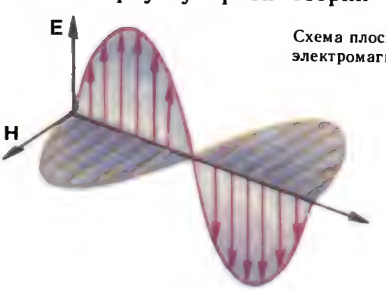


Схема плоской поляризованной электромагнитной волны.

На рисунке ограда служит поляризатором для бегущих по скакалке поперечных волн.

нул идею об отсутствии осевой симметрии светового луча и этим сделал важный шаг к пониманию поляризации света.

В 1808 г. французский физик Э. Малю́с, глядя сквозь кусок исландского шпата на блестевшие в лучах заходящего солнца окна Люксембургского дворца в Париже, к своему удивлению, заметил, что при определенном положении кристалла было видно только одно изображение. На основании этого и других опытов и опираясь на корпускулярную теорию света Ньютона, он предположил, что корпускулы в солнечном свете ориентированы беспорядочно, но после отражения от какой-либо поверхности или прохождения сквозь анизотропный кристалл они приобретают определенную ориентацию. Такой «упорядоченный» свет он назвал поляризованным.

Сегодня известно, что видимый свет представляет собой *электромагнитные волны* с определенной длиной волны. Опыты, в которых была открыта поляризация света, указывают на поперечность этих волн, поскольку свойства продольной волны в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения, различаться не могут. При распространении электромагнитной волны в ней совершают колебания вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$. Эти векторы всегда взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной распространению волны. Если колебания вектора $\vec{E}$ происходят в одной плоскости, то говорят, что свет плоскополяризован (или линейно поляризован), а саму эту плоскость называют плоскостью поляризации. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ могут и вращаться относительно направления распространения света; в этом случае световая волна обладает сложной *поляризацией* (круговой, эллиптической).

Квант света, излученный *атомом*, поляризован всегда. Однако излучение макроскопического источника света (Солнца, электрической лампочки и т. д.) является суммой излучений огромного числа атомов. Каждый из них излучает квант света примерно за 10^{-8} с, и если все атомы будут излучать свет с различной поляризацией, то поляризация всего пучка будет меняться на протяжении таких же промежутков времени. Поэтому в естественном свете все эффекты, связанные с поляризацией, усредняются, и его называют неполяризованным. Для выделения из неполяризованного света части, обладающей желаемой поляризацией, используют так называемые поляризаторы. В их роли может выступать тот же кристалл исландского шпата или турмалина, а также и искусственный поляризатор.

Разберем принцип действия поляризатора на простом механическом примере. Представьте себе двух девочек, которым надоело прыгать через скакалку, и они, став по разные стороны ограды из частых металлических прутьев, решили пускать по скакалке волны. Если волна, пущенная по скакалке, поляризована параллельно прутьям ограды, то она беспрепятственно проходит через ограду. Напротив, поляризованная в перпендикулярном направлении бегущая волна сквозь ограду уже не пройдет, а распадется на две отдельные стоячие волны, отражающиеся по каждую сторону от ограды. Таким образом, ограда служит поляризатором для бегущих по скакалке поперечных волн, пропуская лишь волны, поляризованные в узком диапазоне углов в вертикальной плоскости.

В 1932 г. группа американских ученых во главе с Е. Лэндом изобрела оптический поляризатор, который оказывает на световые волны действие, аналогичное описанному выше. Для изготовления такого поляризатора было выбрано вещество, состоящее из длинных углеводородных цепей. Затем его растянули так, чтобы молекулы выстроились вдоль направления растяжения, и опустили в раствор иода. Молекулы иода «прикрепились» к углеводородным цепям и отдали в них электроны, свободно перемещающиеся вдоль нитей. При падении электромагнитной волны на получившуюся решетку составляющая электрического поля, параллельная нитям, затухает, так как полю приходится совершать работу, разгоняя электроны вдоль нитей; перпендикулярная нитям составляющая электрического поля проходит через такой поляризатор, практически не затухая.

Итак, поляризатор поглощает свет, поляризованный параллельно нитям, и пропускает излучение, поляризованное перпендикулярно ориентации нитей. На той же идее основано

действие «проволочной ограды» — поляризатора для электромагнитных волн сантиметрового диапазона, выполненного в виде ряда параллельных металлических проволок. Если проволоки в такой ограде сделаны из хорошего проводника, то они представляют собой активную нагрузку, аналогично рассмотренным выше углеводородным цепям с лишними электронами.

Если в солнечный день посмотреть на голубое небо сквозь поляризатор, то, вращая его, можно заметить, что на небе возникают темные полосы. Этот опыт свидетельствует о поляризации солнечного света при его рассеянии в атмосфере.

Рис. 2. На больших расстояниях атомы притягиваются друг к другу.

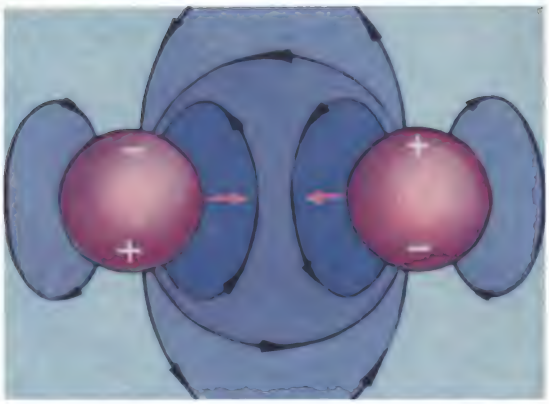
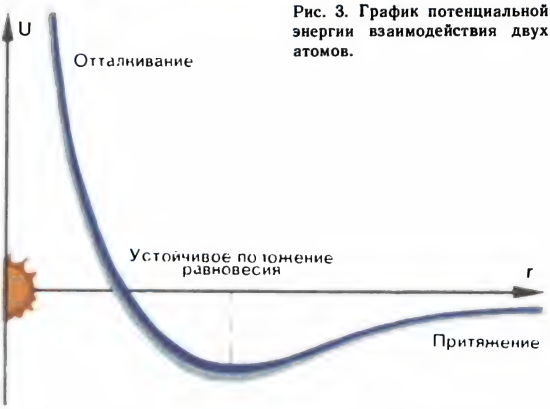


Рис. 3. График потенциальной энергии взаимодействия двух атомов.



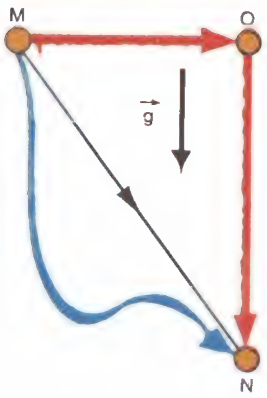
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Еще в древности было открыто золотое правило механики: выигрывая в силе, проигрываешь в расстоянии. Действительно, если, например, поднимать груз по наклонной плоскости, то приходится совершать *работу* против сил тяжести (будем считать, что работой против сил *трения* можно пренебречь). Если наклонная плоскость пологая, то путь длинный, но к грузу можно прикладывать меньшую силу. По крутой плоскости поднимать груз тяжелее, но зато путь короче. Работа, которую надо совершить для того, чтобы поднять груз массы m на высоту h, всегда одинакова и равна mgh.

Это важнейшее свойство сил тяжести: работа не зависит от формы пути, а определяется только начальным и конечным положениями тела. На рис. 1 показаны три возможных перемещения тела из точки M в точку N. Ускорение поля тяжести $\vec{g}$ обозначено стрелкой. Легко доказать, что, перемещая тела по отрезку MN и по ломаной MON, придется совершить одинаковую работу, так как на участке MO работа равна нулю. Разбив кривой путь на множество прямых отрезков, можно убедиться, что в этом случае работа одинаковая.

Силы, обладающие таким свойством, называют потенциальными или консервативными. Для них можно определить *потенциальную энергию*. Достаточно выбрать начало отсчета — считать, что в каком-то положении (например, на поверхности Земли) потенциальная энергия равна нулю, и тогда в любой другой точке она будет равна работе по перемещению тела из начального положения в эту точку.

Рис. 1. Работа по перемещению тела в поле тяжести не зависит от формы пути.



Потенциальная энергия вместе с кинетической энергией составляет полную механическую энергию тела. Если тело находится только в поле потенциальных сил, то полная энергия сохраняется (закон сохранения механической энергии). Чтобы запустить ракету, способную покинуть пределы Солнечной системы, необходимо сообщить ей огромную скорость (около 11 км/с). Запас кинетической энергии компенсирует увеличение потенциальной энергии при удалении ракеты от Земли.

Потенциальны не только силы тяжести, но и силы электростатического взаимодействия. Ведь закон Кулона очень похож на закон всемирного *тяготения* Ньютона. Даже формулы для потенциальной энергии почти одинаковые: в обоих случаях энергия обратно пропорциональна расстоянию между взаимодействующими телами.

Рис. 4. Положение равновесия шарика на кривой поверхности.

В то же время работа сил трения зависит от формы пути (например, при сухом трении короткий путь самый лучший), и такие силы не являются потенциальными.

С помощью потенциальной энергии удобно описывать взаимодействие частиц в микромире, например двух *атомов*. На больших расстояниях между атомами действуют силы притяжения. Хотя каждый атом нейтральный, под воздействием электрического поля другого атома он превращается в маленький *диполь*, и эти диполи притягиваются друг к другу (рис. 2). Поэтому при сближении атомов их надо удерживать и совершать отрицательную работу против этих сил. На малых расстояниях между атомами, напротив, действуют силы отталкивания, обусловленные в основном кулоновским взаимодействием сближающихся ядер. В этом случае для сближения атомов надо совершать положительную работу.

График потенциальной энергии атомов в зависимости от расстояния между ними показан на рис. 3. Потенциальная энергия имеет минимум, и это положение атомов соответствует устойчивому образованию — *молекуле*. В таком случае говорят, что атомы находятся в потенциальной яме.

Точно так же в кристалле атомы располагаются в пространстве таким образом, чтобы он обладал минимальной потенциальной энергией. В результате образуется периодическая структура — кристаллическая решетка (см. *Кристаллофизика*).

Устойчивому положению системы всегда соответствует минимум потенциальной энергии. На рис. 4 показан рельеф поверхности, на которой находится шарик. Имеется три положения равновесия, но только одно, соответствующее минимуму потенциальной энергии, — устойчивое (в данном случае шарик буквально в яме).

Интересно, что если между частицами действуют только силы электростатического взаимодействия (система неподвижных зарядов), то они вообще не могут находиться в состоянии устойчивого равновесия. Потенциальная энергия не имеет минимума, и система обязательно развалится (заряды разлетятся). Эта теорема Ирншоу послужила важнейшим доказательством несостоятельности статической модели *атома*.

ПРИЧИННОСТИ ПРИНЦИП

Принцип причинности есть, собственно, результат элементарного здравого смысла. Если произошли два события, причем первое — причина второго, значит, первое событие произошло раньше, чем второе. Но самое удивительное, что одно это совершенно ясное утверждение помогает получить совсем неочевидные, довольно сложные и очень полезные формулы для описания свойств диэлектрической проницаемости, характеристик движения квантовых частиц при их столкновениях и т. д.

Посмотрим, как связан *принцип причинности* с понятием *времени* в *теории относительности*. Время, как известно, относительно. Пусть в данной инерциальной системе отсчета K два события A и B произошли в моменты времени t_1 и t_2, причем $t_1 < t_2$, т. е. в этой системе событие A случилось раньше события B.

Из теории относительности известно, что при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой отрезок времени $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ не сохраняется. Естественно, возникает вопрос: не найдется ли такая инерциальная система отсчета, в которой $t'_1 = t'_2$? Более того, быть может, есть и такие инерциальные системы отсчета, где $t''_1 > t''_2$?

Чтобы ответить на эти вопросы, рассмотрим два события, для которых квадрат интервала отрицателен (см. *Относительности теория*):

$$S_{12}^2 = c^2\Delta t_{12}^2 - \Delta r_{12}^2 < 0.$$

Ясно, что можно найти такую инерциальную систему отсчета, в которой $\Delta t'_{12} = 0$. Для этого надо лишь удовлетворить равенство:

$$S_{12}^2 = -\Delta r_{12}^2.$$

Поскольку $S_{12}^2 < 0$, это легко сделать. Точно так же можно найти инерциальную систему отсчета, в которой $t''_1 > t''_2$.

Не являются ли эти примеры нарушением принципа причинности? В них квадрат интервала S_{12}^2 отрицателен. Следовательно, $\Delta r_{12} > c\Delta t_{12}$. Но это значит, что рассматриваемые события не могут быть причинно связаны: любой сигнал, посланный из точки *1* в момент, когда совершилось событие *1*, придет в точку *2* после того, как произойдет событие *2*. Два таких события, например, не могут произойти с одним телом (см. *Относительности теория*). И если $S_{12}^2 < 0$, то, действительно, можно найти такую инерциальную систему отсчета, где $t''_1 > t''_2$. Однако принципу причинности это никак не противоречит.

ПРОВОДИМОСТЬ

Сто́ит приложить к металлической проволоке относительно небольшое электрическое напряжение, как через нее начинает протекать электрический ток большой величины. При напряжении всего 0,017 В через кусок медной проволоки сечением 1 мм^2 и длиной 1 м идет ток силой 1 А. Естественно было предположить, что в *металлах* существуют свободные носители электрического тока, и это было доказано опытным путем. Если проводник разогнать до скорости v_0, а затем затормозить до остановки ускорением w, то через него пройдет заряд q. По величине q, проводимости проводника и его геометрическим размерам можно вычислить отношение заряда e к массе m носителей тока. По данным английских ученых Толмена и Стюарта, измеривших величину q при торможении проводника, отношение e/m оказалось таким же, как и у свободных электронов. Так было доказано, что в металлах носители тока — *электроны*.

До создания *квантовой механики* проводимость металлов объясняли, рассматривая движение электронного газа с концентрацией n; частицы этого газа — электроны — сталкиваются с ионами кристаллической решетки металла. При этом зависимость удельной проводимости σ от среднего расстояния λ между двумя последовательными соударениями электрона, движущегося со скоростью v, с ионами решетки предстанет в виде: $\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2mv}$.

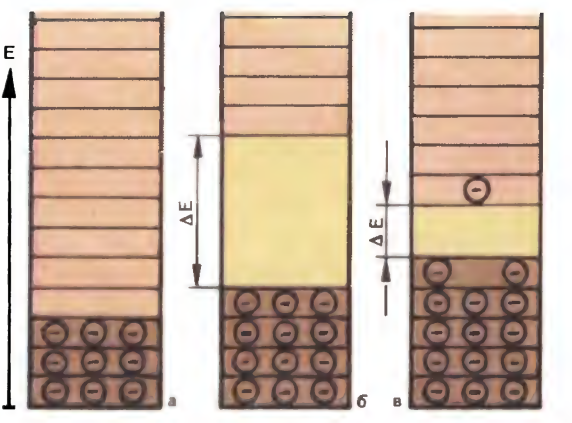
В этой формуле v — скорость теплового движения электрона. Обычно создаваемые в металле электрические поля дают малый вклад в величину скорости электрона и поэтому не влияют на проводимость. Скорость теплового движения электрона $v \sim \sqrt{T}$. Однако известно, что проводимость убывает обратно пропорционально температуре T. При таком подходе возникали и другие трудности, например, получалось расходящееся с опытом значение *теплоемкости* металлов. С классической точки зрения электронный газ вносил бы свою долю в теплоемкость металлов, которая была бы в 1,5 раза выше, чем у *диэлектриков*.

Все эти трудности были преодолены квантовой теорией проводимости, которая рассматривает движение электронов сквозь кристаллическую решетку как распространение электронных волн де Бройля. По этой теории узлы решетки не могут быть для электронной волны преградой. Волна может «обтекать» их и распространяться без рассеяния на большие расстояния. При этом среднее расстояние λ, на котором происходит рассеяние, обратно пропорционально температуре T при комнатных температурах и $\sim 1/T^5$ при температурах, близких к абсолютному нулю. Все это полностью соответствует экспериментальным данным. Квантовая теория объяснила и явление *сверхпроводимости*, наблюдаемое у некоторых проводников при очень низких температурах.

Квантовая теория проводимости *твердых тел* основывается на з о н н о й т е о р и и. В твердых телах электроны принимают только определенные значения энергии. Каждое такое значение энергии на схеме (см. рис.) представлено горизонтальной прямой — э н е р г е т и ч е с к и м у р о в н е м. Уровни группируются в зоны, отделенные друг от друга энергетическими промежутками, принадлежащими зоне.

У *металлов* зоны либо перекрываются между собой, либо не целиком заполнены электронами. И в металле под действием электрического поля электрон свободно переходит с уровня на уровень, так как расстояние между уровнями в зоне 10^{-28} эВ, а энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле источника, 10^{-4} — 10^{-8} эВ. Легкая возможность перехода с уровня на уровень и означает свободное движение электрона.

В *полупроводниках* и изоляторах заполненная зона отделяется от свободной э н е р г е т и ч е с к о й щ е л ь ю, ширина которой достигает нескольких электронвольт. Через эту запрещенную зону электроны могут переходить за счет тепловой энергии. Вероятность таких переходов увеличивается с ростом температуры. Поэтому с повышением температуры проводимость полупроводников и диэлектриков возрастает — это важнейшее их отличие от металлов. Изоляторы и полупроводники различаются между собой тем, что у изоляторов запрещенная зона шире, чем у полупроводников. Кроме того, у полупроводников важную роль играет п р и м е с н а я п р о в о д и м о с т ь, когда в запрещенной зоне появляются дополнительные уровни из-за примесных атомов,



Схемы энергетических электронных зон.
а) Металлы. Непосредственно над заполненными уровнями находятся свободные уровни. б) Изоляторы. Заполненная зона отделена от свободных уровней энергетической щелью ΔE. в) Полупроводники. Структура зон такая же, как и у изоляторов, но ширина запрещенной зоны ΔE значительно меньше.

входящих в кристаллическую решетку полупроводника.

У *металлов* удельное сопротивление (а именно этой величиной характеризуют обычно проводящие свойства твердого тела) при комнатной температуре находится в интервале от $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом/м — у серебра до $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ом/м — у висмута. К *полупроводникам* относят материалы с удельным сопротивлением от 10^{-5} до 10^{8} Ом/м. Изоляторы обладают удельным сопротивлением до 10^{16} Ом/м.

Проводимость в системе СИ измеряется в сименсах (См). 1 См равен электрической проводимости участка электрической цепи с сопротивлением 1 Ом. Удельная электрическая проводимость измеряется в См/м.

В электролитах и *газах* носители тока — ионы. Их масса на три порядка выше, чем у электронов, и следовательно, подвижность мала по сравнению со средней скоростью, придаваемой электронам электрическим полем в проводниках. Поэтому и проводимость электролитов невелика в сравнении с проводимостью металлов. В газах проводимость возникает благодаря появлению ионов в результате *ионизации* атомов ультрафиолетовым излучением, *рентгеновскими лучами* и т. д.

ПРОСТРАНСТВО

В начале нашего столетия, в 1916 г., А. Эйнштейн создал общую *теорию относительности* (см. *Относительности теория*). Иначе ее называют теорией *пространства-времени*. Словосочетание «пространство-время» пишут через дефис, так как оказалось, что эти понятия не независимы друг от друга, а органически связаны. До создания общей теории относительности думали иначе, основываясь на законах *механики* И. Ньютона, а также на открытом им же законе всемирного тяготения (см. *Тяготение*). Поэтому доэйнштейновские представления о *пространстве* и *времени* называют ньютоновскими. Не следует думать, что создание эйнштейновской теории пространства-времени означало неправильность законов Ньютона. На самом деле, как оказалось, они верны лишь в относительно небольших по астрономическим масштабам областях пространства и для относительно коротких по тем же меркам промежутков времени. Они перестают соответствовать действительности только тогда, когда речь идет об описании Вселенной в целом или, по крайней мере, доступной астрономическим наблюдениям ее части, которую называют Метагалактикой, а также в сильных полях тяготения.

К чему сводятся ньютоновские представления о пространстве и времени? Согласно Ньютону, и пространство, и время абсолютны. Это означает, что пространство, в котором мы живем, может быть уподоблено существующему вечно, неограниченно большому, неподвижному «ящику» без стенок — вместилищу *материи*. Свойства этого «ящика» не меняются с течением времени и не зависят от того, как в нем распределено и перемещается вещество. Время во всех точках пространства текло и течет одинаково, т. е., в какие бы области пространства мы ни помещали часы, время они будут отсчитывать с одной и той же скоростью (см. *Время*). Распределение вещества в таком неизменном пространстве и его движение определяются действием закона всемирного тяготения. Согласно этому закону, тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их *масс* и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Поскольку время во всех областях пространства течет одинаково, а само пространство неизменно, то с помощью закона всемирного тяготения всегда можно рассчитать положение и движения небесных тел и друг относительно друга, и относительно «ящика» — абсолютного пространства.

В математике свойства какого-либо пространства, или, как говорят, его метрика, определяются видом той линии, которая кратчайшим образом соединяет две произвольные точки в нем. Как известно из повседневного опыта, в пространстве, в котором мы живем, кратчайшее расстояние между двумя точками есть прямая линия. Такое *пространство* называется евклидовым — по имени древнегреческого математика Евклида, который первым рассмотрел его свойства.

Вместе с тем мыслимы, конечно, и другие виды пространств. Например, представим себе двумерных существ, которые не имеют понятия о существовании третьего измерения. Если они располагаются на плоскости, то их пространство также будет им представляться евклидовым. Это связано с тем, что на плоскости кратчайшее расстояние между двумя точками есть прямая линия. Если же эти существа живут, например, на сфере, то кратчайшее расстояние между двумя точками на ней это уже не прямая линия, а дуга большого круга, соединяющая точки. Такое пространство неевклидово. Неевклидово пространство можно установить по свойствам геометрических фигур. Например, сумма углов треугольника в нем не равна π; отношение длины окружности к диаметру также не равно π и т. д.

Из общей теории относительности Эйнштейна следует, что реальное пространство нашей Вселенной неевклидово (см. *Относительности теория*). Более того, геометрия нашего пространства меняется с течением времени, а само время течет с разной скоростью в различных областях Вселенной. Именно поэтому

общую теорию относительности называют, как упоминалось, теорией пространства-времени. Согласно этой теории, геометрические свойства пространства, изменение его геометрии со временем, а также скорость течения самого времени зависят от распределения и движения вещества — *материи*. В свою очередь, движение материи и распределение ее в пространстве зависят от его геометрии. Поэтому нельзя в действительности рассматривать отдельно поведение материи в неизменном, «застывшем» абсолютном пространстве — «ящике», как это следовало из ньютоновских представлений. Оба процесса взаимосвязаны: распределение и движение материи изменяют геометрию пространства-времени, а изменение геометрии пространства-времени определяет характер распределения и движения в нем материи. Эти процессы самосогласованы. А это означает, что и пространство, и время не абсолютны, а относительны — они проявляют себя по-разному в зависимости от конкретных условий.

Согласно общей теории относительности, степень искривления пространства, т. е. степень отклонения его от евклидовой геометрии, сильнее там, где материя обладает большей энергией. В этих же условиях время течет медленнее.

Как совместить все эти представления с тем известным из повседневного опыта фактом, на котором основана ньютоновская теория пространства и времени, что кратчайшее расстояние между двумя точками в земных условиях и даже в космических (когда речь идет, например, о расстояниях до ближайших звезд нашей Галактики) есть все-таки прямая линия? Ответ заключается в том, что в таких ситуациях мы всегда имеем дело с относительно небольшими расстояниями. Легко понять, что если взять, например, окружность очень большого радиуса, выделить на ней маленькую дугу и соединить концы ее хордой, то зрительно такая хорда будет мало отличаться от этой дуги. Значит, для того, чтобы кривизна стала заметной, нужно, очевидно, выделить достаточно длинную дугу.

Каковы же те расстояния во Вселенной, на которых уже заметна кривизна нашего пространства? Расстояния в космосе измеряют парсеками или световыми годами. Один парсек (пс) равен $3 \cdot 10^{18}$ см. Световой год — это расстояние, которое проходит свет за 1 год. Поскольку скорость света $c =$ $= 300\,000$ км/с, а 1 год $= 3 \cdot 10^7$ с, то 1 световой год $\approx 0{,}9 \cdot 10^{18}$ см $\approx 0{,}3$ пс. Расстояние от Солнца до Земли приблизительно равно $1{,}5 \cdot 10^{13}$ см, т. е. $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ пс. Ближайшие звезды удалены от нас на расстояние в несколько парсек. Размеры нашей Галактики, содержащей приблизительно 100 миллиардов звезд, порядка 30 000 пс. Но и эти расстояния малы, на них кривизна пространства еще не проявляется. Она начинает проявляться лишь на расстояниях, исчисляемых десятками и сотнями миллионов парсек.

До сих пор мы говорили о геометрии пространства Вселенной в целом. Однако искривление пространства и изменение скорости течения времени могут заметно проявляться и в отдельных небольших участках нашей Вселенной, а именно там, где имеются сильные гравитационные поля. Такая ситуация возникает, например, вблизи так называемых «черных дыр» — особых областей пространства-времени. Что это за области?

Пусть имеется шар массой M с радиусом R. Тогда любое тело может преодолеть гравитационное притяжение такого шара и покинуть его, если ему придать вторую космическую скорость, равную $v = \frac{\sqrt{2GM}}{R}$, где $G = 6{,}67 \cdot$ $\cdot 10^{-11}$ Н$\cdot$м^{2}кг$^{-2}$ — постоянная тяготения. Если, не меняя массы шара M, уменьшать его радиус (сжимая его), то при $R = r_g =$ $= \frac{2GM}{c^2}$ вторая космическая скорость станет равной скорости света c. Величина r_g называется гравитационным радиусом. Согласно теории относительности, движения тел со скоростями, бóльшими скорости света, невозможны. И если сжать шар до гравитационного радиуса, то даже свет не сможет его покинуть. (Конечно, приведенный здесь вывод величины гравитационного радиуса, основанный на законах Ньютона, в сильных полях тяготения, строго говоря, несправедлив и носит лишь качественный, иллюстративный характер.) Это значит, что никакая информация не сможет поступать из-под поверхности шара к внешнему наблюдателю, так как скорость света — это максимально возможная скорость передачи любой информации. Возникает феномен «черной дыры». На языке геометрии это будет означать: пространство в том месте, где находится «черная дыра», искривлено настолько, что движущиеся в нем любые материальные частицы никогда не достигнут далекого наблюдателя.

Кривизна пространства проявляется и в менее экзотических условиях. Она становится уже заметной вблизи достаточно массивных тел, таких, например, как Солнце, масса которого равна $M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г. Именно таким образом была осуществлена одна из первых наблюдательных проверок общей теории относительности. Как известно, свет распространяется всегда кратчайшим путем от источника к наблюдателю. Поэтому если бы на Земле можно было увидеть отклонение (по отношению к контрольным звездам) луча света далекой звезды, проходящего у края солнечного диска, то это как раз и означало бы, что пространство вблизи Солнца (массивного тела) искривлено.

Потому что это, в свою очередь, означало бы, что вблизи Солнца свет движется не по прямой линии, а по некоторой искривленной траектории. Разумеется, такой опыт можно поставить во время солнечного затмения, чтобы свет Солнца не мешал наблюдать слабый свет, идущий от далекой звезды. Когда такой опыт был поставлен, он подтвердил правильность теории пространства-времени, созданной Эйнштейном.

ПРОТОН

Протон — стабильная частица из класса *адронов*, ядро атома водорода. Трудно сказать, какое событие следует считать открытием протона: ведь как ион водорода он был известен уже давно. В открытии протона сыграли роль и создание Э. Резерфордом планетарной модели *атома* (1911), и открытие *изотопов* (Ф. Содди, Дж. Томсон, Ф. Астон, 1906 — 1919), и наблюдение ядер водорода, выбитых *альфа-частицами* из ядер азота (Э. Резерфорд, 1919). В 1925 г. П. Блэкетт получил в камере Вильсона (см. *Детекторы ядерных излучений*) первые фотографии следов протона, одновременно подтвердив открытие искусственного превращения элементов. В этих опытах α-частица захватывалась ядром азота, которое испускало протон и превращалось в изотоп кислорода.

Вместе с *нейтронами* протоны образуют *атомные ядра* всех химических элементов, причем число протонов в ядре определяет атомный номер данного элемента (см. *Периодическая система химических элементов*).

Протон имеет положительный электрический заряд, равный элементарному заряду, т. е. абсолютной величине заряда *электрона*. Это проверено на эксперименте с точностью до 10^{-21}. Масса протона $m_p = (938{,}2796 \pm \pm 0{,}0027)$ МэВ или $\simeq 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ г, т. е. протон в 1836 раз тяжелее электрона! С современной точки зрения протон не является истинно элементарной частицей: он состоит из двух u-кварков с электрическими зарядами $+2/3$ (в единицах элементарного заряда) и одного d-кварка с электрическим зарядом $-1/3$. *Кварки* связаны между собой обменом другими гипотетическими частицами — глюонами, квантами поля, переносящего *сильные взаимодействия*. Данные экспериментов, в которых рассматривались процессы рассеяния электронов на протонах, действительно свидетельствуют о наличии внутри протонов точечных рассеивающих центров. Эти опыты в определенном смысле очень похожи на опыты Резерфорда, приведшие к открытию *атомного ядра*. Будучи составной частицей, протон имеет конечные размеры $\simeq 10^{-13}$ см, хотя, разумеется, его нельзя представлять как твердый шарик. Скорее, протон напоминает облако с размытой границей, состоящее из рождающихся и аннигилирующих виртуальных частиц.

Протон, как и все адроны, участвует в каждом из фундаментальных взаимодействий. Так, *сильные взаимодействия* связывают протоны и нейтроны в ядрах, электромагнитные взаимодействия — протоны и электроны в атомах. Примерами *слабых взаимодействий* могут служить *бета-распад* нейтрона $n \to p + e^- + \nu_e$ или внутриядерное превращение протона в нейтрон с испусканием позитрона и *нейтрино* $p \to n + e^+ + \nu_e$ (для свободного протона такой процесс невозможен в силу закона сохранения и превращения энергии, так как нейтрон имеет несколько бóльшую массу).

Спин протона равен 1/2. Адроны с полуцелым спином называются барионами (от греческого слова, означающего «тяжелый»). К барионам относятся *протон, нейтрон,* различные гипероны (Λ, Σ, Ξ, Ω) и ряд частиц с новыми квантовыми числами, большинство из которых еще не открыто. Для характеристики барионов введено особое число — барионный заряд, равный 1 для барионов, -1 — для антибарионов и 0 — для всех прочих частиц. Барионный заряд не является источником барионного поля, он введен лишь для описания закономерностей, наблюдавшихся в реакциях с частицами. Эти закономерности выражаются в виде закона сохранения барионного заряда: разность между числом барионов и антибарионов в системе сохраняется в любых реакциях. Сохранение барионного заряда делает невозможным распад протона, ибо он легчайший из барионов. Этот закон носит эмпирический характер и, безусловно, должен быть проверен на эксперименте. Точность закона сохранения барионного заряда характеризуется стабильностью протона, экспериментальная оценка для времени жизни которого дает значение не меньше 10^{32} лет.

В то же время в теориях, объединяющих все виды фундаментальных взаимодействий (см. *Единство сил природы*), предсказываются процессы, приводящие к нарушению барионного заряда и к распаду протона (например, $p \to \pi^\circ + e^+$). Время жизни протона в таких теориях указывается не очень точно: примерно $10^{32 \pm 2}$ лет. Это время огромно, оно во много раз больше времени существования Вселенной ($\simeq 2 \cdot 10^{10}$ лет). Поэтому протон практически стабилен, что сделало возможным образование химических элементов и в конечном итоге появление разумной жизни. Однако поиски распада протона представляют сейчас одну из важнейших задач экспериментальной физики. При времени жизни протона $\simeq 10^{32}$ лет в объеме воды в 100 м^3 (1 м^3 содержит $\simeq 10^{30}$

протонов) следует ожидать распада одного протона в год. Остается «всего лишь» зарегистрировать этот распад. Открытие распада протона станет важным шагом к правильному пониманию единства сил природы.

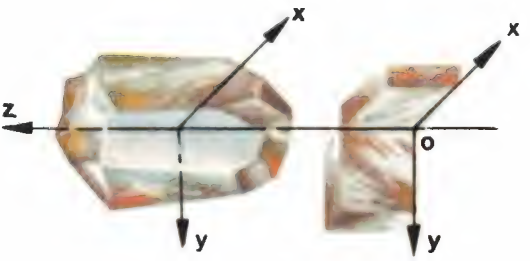
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Один из способов контроля ответственных деталей механизмов и машин — ультразвуковая дефектоскопия. Процесс поиска дефектов осуществляется с помощью ультразвукового дефектоскопа — УЗД (рис. 1). Главный элемент такого прибора — кварцевая пластинка. Когда на нее падает отраженная дефектом звуковая волна, кварц сжимается и растягивается с частотой колебаний звуковой волны и на его гранях возникает переменное электрическое напряжение. Это — следствие прямого пьезоэлектрического эффекта. Его сущность состоит в том, что под действием механического напряжения на поверхности кварца и некоторых других *диэлектриков* возникает электрический заряд в результате поляризации диэлектрика.

Если же на обкладки кварцевой пластины подать импульс переменного напряжения, то кварцевая пластина начинает колебаться с частотой ν подаваемого напряжения и становится источником акустических колебаний той же частоты. Такое возникновение механических напряжений в кристалле под действием приложенного к нему электрического поля называют обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Пьезоэлектрический эффект присущ только кристаллам, элементарные ячейки которых не имеют центра симметрии. Это ионные кристаллы, состоящие как бы из двух или нескольких

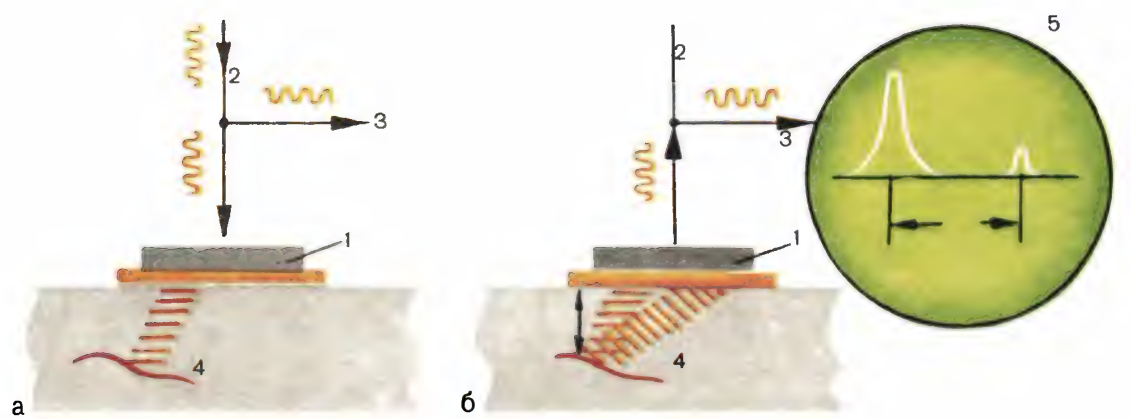
Рис. 2. Кристалл кварца и ориентация срезов пластин, применяемых в генераторах ультразвуковых колебаний.



«вдвинутых» одна в другую простых решеток, каждая из которых построена из ионов одного знака — либо положительных, либо отрицательных. При деформации кристалла эти простые решетки сдвигаются относительно друг друга. При этом изменяется электрический момент кристалла: на его гранях появляется электрическое напряжение. Поляризация пьезоэлектрика в электрическом поле приводит к его деформации — обратному пьезоэлектрическому эффекту.

Чтобы получить пригодные для генерации ультразвуковых колебаний кварцевые пластинки, их вырезают из кристалла кварца с высокой точностью ориентации относительно кристаллографических осей (рис. 2). Пьезоэлектрические свойства гораздо сильнее, чем у кварца, выражены у сегнетовой соли. Только ее хрупкость и небольшие рабочие температуры ограничивают применение этого пьезоэлектрика. В сильной степени пьезоэлектрический эффект проявляется в кристаллах титаната свинца, его производных и у дигидрофосфата аммония. Такие кристаллы — основа пьезоэлектрических микрофона и телефона; они преобразуют давление в электродвижущую силу в манометрах, служат для стабилизации частоты радиопередатчиков, измерения механических напряжений и вибраций.

Рис. 1. Схема ультразвукового дефектоскопа. От генератора на кварцевую пластинку (*1*) поступает высокочастотный импульс (*2*). Кварцевая пластинка начинает колебаться и излучает ультразвуковые волны в объем испытываемой металлической детали. Отражаясь от дефекта, например трещины, ультразвук возвращается на пластинку и превращается в электрические колебания (*3*), поступающие на осциллограф (*5*). По расстоянию между прямым и отраженным импульсами можно определить глубину залегания дефекта (*4*).



Р

РАБОТА

В окружающем нас мире все тела взаимодействуют между собой посредством тех или иных сил (см. *Сила*). В результате их действия тела могут перемещаться. Если под воздействием силы $\vec{F}$ тело перемещается на некоторое расстояние s, то она совершает над этим телом работу. В простейшем случае, когда сила $\vec{F}$ постоянна и перемещение тела происходит в направлении данной силы, работа определяется произведением этих величин:

$$A = F \cdot s. \qquad (1)$$

Если сила направлена под углом α к вектору перемещения, то ее можно разложить на две составляющие: продольную $F_{\parallel} = F \cdot \cos \alpha$, направленную по вектору перемещения, и поперечную $F_{\perp} = F \cdot \sin \alpha$, направленную перпендикулярно ему. В таком случае работа силы определяется лишь ее продольной составляющей:

$$A = F_{\parallel} \cdot s = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \qquad (2)$$

В этой формуле легко узнать выражение для скалярного произведения векторов $\vec{F}$ и $\vec{s}$: $A = (\vec{F} \cdot \vec{s})$. Таким образом, работа постоянной силы $\vec{F}$ при перемещении тела на расстояние $\vec{s}$ является скалярной величиной, численно равной скалярному произведению этих двух векторов.

В зависимости от величины угла α работа может быть как положительной, так и отрицательной. Если $\alpha < 90^\circ$, то составляющая силы совпадает по направлению с вектором перемещения, и работа положительна, поскольку $\cos \alpha > 0$ в формуле (1).

Если же $\alpha > 90^\circ$, то продольная составляющая $\vec{F}_{\parallel}$ направлена противоположно перемещению тела, и работа этой силы оказывается отрицательной. В этом случае иногда говорят, что работа совершается против силы $\vec{F}_{\parallel}$. Так, например, если конькобежец перестает отталкиваться, то он некоторое время продолжает двигаться по *инерции*. При этом действующая на него сила *трения* направлена противоположно перемещению конькобежца и ее работа отрицательна, т. е. совершается против силы трения.

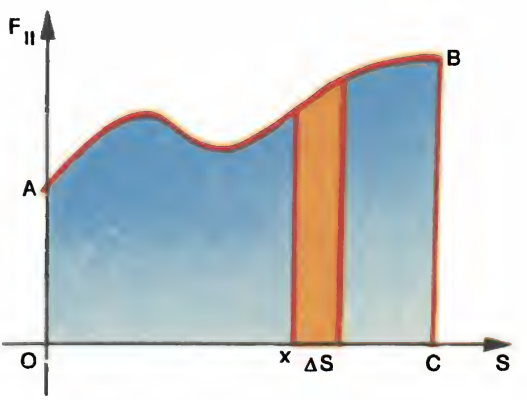
Из выражения (2) следует, что при $\alpha = 90^\circ$ работа силы равна 0, несмотря на то что ни сила, ни перемещение нулю не равны. Дело в том, что при $\alpha = 90^\circ$ проекция силы на направление перемещения равна нулю, что приводит к нулевой работе, согласно ее приведенному выше определению. Значит, работа центростремительной силы, которая всегда перпендикулярна перемещению тела в его движении по окружности, всегда равна нулю.

Если графически изобразить зависимость $F_{\parallel}$ от перемещения, то станет очевидно, что работа определяется площадью закрашенного на графике четырехугольника. Такое графическое изображение позволяет наглядно представить работу силы $F_{(x)}$, которая изменяется от точки к точке. Пусть под действием этой силы тело, находящееся в точке x_0, перемещается на малое расстояние Δx. Работа силы при этом перемещении (так называемая элементарная работа) составляет $\Delta A = F_{\parallel}(x)\Delta x$, так как при столь малом перемещении сила практически не изменяется. Если мы снова обратимся к графику зависимости $F_{\parallel}(x)$, то ΔA изобразится площадью закрашенного на графике столбика.

Полная же работа силы $F(x)$ при переме-

Мальчик, который везет салазки, совершает работу против силы трения.

Работа графически определяется площадью криволинейной трапеции *OABC*.



щении тела из точки O в точку C определится суммой элементарных работ на каждом малом участке пути, т. е. суммой площадей всех таких столбиков, которые составят площадь криволинейной трапеции $OABC$.

Понятие работы тесно связано с механической энергией при переходе системы из одного состояния в другое. А именно: изменение энергии системы определяется работой, совершенной внешними силами, приложенными к системе. Очень важно понимать, что механическая работа может переходить не только в механическую, но и в другие формы энергии. Так, работа, совершаемая против сил трения, переходит в тепло, а работа по вращению ротора динамомашины преобразуется в электромагнитную энергию.

В 1843 г. английский ученый Дж. Джоуль совершил важнейшее открытие в учении о теплоте. С помощью разработанного им прибора (нагревая воду в калориметре вращением колесика с лопастями) он доказал эквивалентность механической и тепловой энергии. Полученный результат он сформулировал следующим образом:

«Количество тепла, способное увеличить температуру одного фунта воды на один градус Фаренгейта, равно и может быть превращено в механическую силу, которая в состоянии поднять 838 фунтов на высоту один фут».

Теперь можно самостоятельно проделать небольшой расчет — перевести этот эквивалент на современные единицы — калории и джоули (1 фунт — 454 г, 1 фут — 30,5 см; по шкале Фаренгейта точка кипения воды соответствует 212° С, а замерзания 32° С при нормальных условиях).

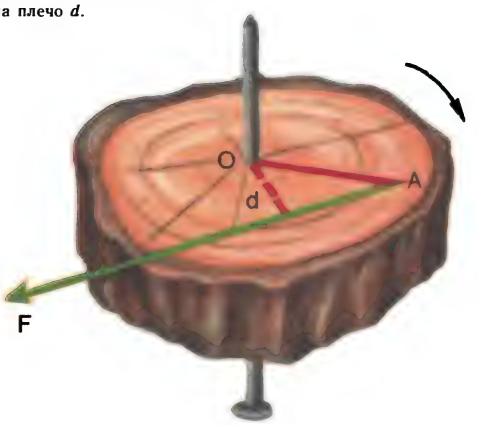
РАВНОВЕСИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Равновесием механической системы называют такое ее состояние, при котором все точки рассматриваемой системы покоятся по отношению к выбранной *системе отсчета.*

Проще всего выяснить условия равновесия на примере простейшей механической системы — материальной точки. Согласно первому закону динамики (см. *Механика*), условием покоя (или равномерного прямолинейного движения) материальной точки в инерциальной системе координат является равенство нулю векторной суммы всех приложенных к ней сил.

При переходе к более сложным механическим системам одного этого условия для их равновесия оказывается недостаточно. Кроме поступательного движения, к которому приводят нескомпенсированные внешние силы, сложная механическая система может совершать вращательное движение или деформироваться. Выясним условия равновесия абсолютно *твердого тела* — механической системы, состоящей из собрания частиц, взаимные расстояния между которыми не изменяются.

Моментом силы относительно какой-либо оси называют произведение величины этой силы F на плечо d.



Возможность поступательного движения (с ускорением) механической системы можно устранить так же, как и в случае с материальной точкой, потребовав равенства нулю суммы сил, приложенных ко всем точкам системы. Это и есть первое условие равновесия механической системы.

В нашем случае твердое тело деформироваться не может, поскольку мы условились, что взаимные расстояния между его точками не изменяются. Но в отличие от материальной точки к абсолютно твердому телу можно приложить пару равных и противоположно направленных сил в разных его точках. При этом поскольку сумма этих двух сил равна нулю, то рассматриваемая механическая система поступательного движения совершать не будет. Однако очевидно, что под действием такой пары сил тело начнет вращаться относительно некоторой оси со всевозрастающей угловой скоростью.

Возникновение в рассматриваемой системе вращательного движения обусловлено наличием нескомпенсированных моментов сил. Моментом силы относительно какой-либо оси называется произведение величины этой силы F на плечо d, т. е. на длину перпендикуляра, опущенного из точки O (см. рис.), через которую проходит ось, на направление силы. Отметим, что момент силы при таком определении — алгебраическая величина: он считается положительным, если сила приводит к вращению против часовой стрелки, и отрицательным — в противном случае. Таким образом, второе условие равновесия твердого тела заключается в требовании равенства нулю суммы моментов всех сил относительно любой оси вращения.

В случае, когда оба найденных условия рав-

новесия выполнены, твердое тело будет пребывать в состоянии покоя, если в момент начала действия сил скорости всех его точек были равны нулю. В противном случае оно будет совершать равномерное движение по *инерции*.

Рассмотренное определение равновесия механической системы ничего не говорит о том, что произойдет, если система чуть-чуть выйдет из положения равновесия. При этом имеется три возможности: система вернется в свое прежнее состояние равновесия; система, несмотря на отклонение, не изменит своего состояния равновесия; система выйдет из состояния равновесия. Первый случай называют устойчивым состоянием равновесия, второй — безразличным, третий — неустойчивым. Характер положения равновесия определяется зависимостью *потенциальной энергии* системы от координат. На рисунке показаны все три типа равновесия на примере тяжелого шарика, находящегося в углублении (устойчивое равновесие), на гладком горизонтальном столе (безразличное), на вершине бугорка (неустойчивое) (см. рис. на с. 220).

Изложенный выше подход к проблеме равновесия механической системы рассматривался учеными еще в древнем мире. Так, закон равновесия рычага (т. е. твердого тела с закрепленной осью вращения) был найден Архимедом в III в. до н. э.

В 1717 г. Иоганн Бернулли разработал совершенно иной подход к нахождению условий равновесия механической системы — метод виртуальных перемещений. В основе его лежит вытекающее из *закона сохранения энергии* свойство сил реакций связей: при малом отклонении системы от положения равновесия полная работа сил реакций связей равна нулю.

При решении задач статики (см. *Механика*) на основании описанных выше условий равновесия существующие в системе связи (опоры, нити, стержни) характеризуются возникающими в них силами реакции. Необходимость учета этих сил при определении условий равновесия в случае систем, состоящих из нескольких тел, приводит к громоздким расчетам. Однако благодаря равенству нулю работы сил реакции связей при малых отклонениях от положения равновесия можно избежать рассмотрения этих сил вообще.

Кроме сил реакции на точки механической системы действуют и внешние силы. Какова их работа при малом отклонении от положения равновесия? Так как система первоначально покоится, то для любого ее перемещения необходимо совершить некоторую положительную работу. В принципе эту работу могут совершать как внешние силы, так и силы реакции связей. Но, как мы уже знаем, полная работа сил реакции равна нулю. Поэтому для того, чтобы система вышла из состояния равновесия, суммарная работа внешних сил при любом возможном перемещении должна быть положительной. Следовательно, условие невозможности движения, т. е. условие равновесия, можно сформулировать как требование неположительности полной работы внешних сил при любом возможном перемещении: $\Delta A \leqslant 0$.

Допустим, что при перемещениях точек системы $\Delta\vec{\gamma}_1 \ldots \Delta\vec{\gamma}_n$ сумма работ внешних сил оказалась равной ΔA_1. А что произойдет, если система совершит перемещения $-\Delta\vec{\gamma}_1$, $-\Delta\vec{\gamma}_2, \ldots, -\Delta\vec{\gamma}_n$? Эти перемещения возможны так же, как и первые; однако работа внешних сил теперь изменит знак: $\Delta A_2 = -\Delta A_1$. Рассуждая аналогично предыдущему случаю, мы придем к выводу, что теперь условие равновесия системы имеет вид: $\Delta A_1 \geqslant 0$, т. е. работа внешних сил должна быть неотрицательной. Единственная возможность «примирить» два этих почти противоречивых условия — потребовать точного равенства нулю полной работы внешних сил при любом возможном (виртуальном) перемещении системы из положения равновесия: $\Delta A = 0$. Под возможным (виртуальным) перемещением тут подразумевается бесконечно малое мысленное перемещение системы, которое не противоречит наложенным на нее связям.

Итак, условие равновесия механической системы в виде принципа виртуальных перемещений формулируется следующим образом:

«Для равновесия любой механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы сумма элементарных работ действующих на систему сил при любом возможном перемещении была равна нулю».

С помощью принципа виртуальных перемещений решаются задачи не только статики, но и гидростатики, и *электростатики*.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Французский физик А. Беккерель 1 марта 1896 г. обнаружил по почернению фотопластинки испускание солью урана невидимых лучей сильной проникающей способности. Вскоре он выяснил, что свойством лучеиспускания обладает сам уран. Затем подобное качество было обнаружено и у тория. *Радиоактивность* (такое название получило открытое явление) оказывалась привилегией самых тяжелых элементов *периодической системы* Д. И. Менделеева. В 1898 г. французские ученые М. Склодовская-Кюри и П. Кюри выделили из уранового минерала два новых вещества, радиоактивных в гораздо более сильной степени, чем уран

и торий. Так были открыты два неизвестных ранее радиоактивных элемента — полоний и радий.

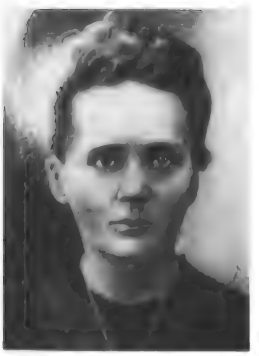
Ученые пришли к выводу, что радиоактивность представляет собой самопроизвольный процесс, происходящий в атомах радиоактивных элементов. Теперь это явление определяют как самопроизвольное превращение неустойчивого изотопа одного химического элемента в изотоп другого элемента (см. *Изотопы*); при этом происходит испускание *электронов, протонов, нейтронов* или ядер гелия (α-частиц) (см. *Альфа-распад*).

Среди элементов, содержащихся в земной коре, радиоактивными являются все с порядковыми номерами более 83, т. е. расположенные в таблице Менделеева после висмута. У них вообще нет стабильных изотопов. Естественная радиоактивность обнаружена у отдельных изотопов других элементов. А технеций ($Z = 43$) и прометий ($Z = 61$), хотя и размещены в середине периодической системы, также не имеют

ПЬЕР КЮРИ (1859 — 1906) МАРИЯ СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ (1867 — 1934)

К 35 годам своей жизни французский ученый Пьер Кюри был широко известен среди физиков. Он сделал интересные открытия в области изучения кристаллов, обнаружил пьезоэлектрический эффект (см. *Пьезоэлектричество*). Всеобщее признание принесли ему исследования магнитных свойств тел при высоких температурах. Он нашел, что у железа исчезают ферромагнитные свойства выше некоторой температуры (точка Кюри), и количественно определил зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от температуры (закон Кюри) (см. *Магнетизм*).

Но вскоре сфера его научных интересов круто изменилась. Он занялся изучением природы урановых лучей и привлек к этим исследованиям свою жену, выпускницу Парижского университета Марию Склодовскую-Кюри.



За десять лет совместной работы они сделали очень многое для изучения явления *радиоактивности*. Это был беззаветный труд во имя науки — в плохо оборудованной лаборатории и при отсутствии необходимых средств. Уже в 1898 г. супруги открывают два новых радиоактивных элемента — полоний и радий. Мария, кроме того, обнаруживает (независимо от немецкого физика Г. Шмидта) явление радиоактивности у тория. Кстати, она первой и предложила термин *радиоактивность*. Пьер установил самопроизвольное выделение тепла солями радия. Этот препарат радия исследователи получили в 1902 г. в количестве 0,1 г. Для этого им потребовалось 45 месяцев напряженного труда и более 10 000 химических операций осаждения и кристаллизации.

В 1903 г. за открытия в области радиоактивности супругам Кюри и А. Беккерелю была присуждена Нобелевская премия по физике. Вторую премию М. Склодовская-Кюри получит восемь лет спустя, на сей раз по химии — «за открытие элементов радия и полония, за выяснение природы радия и выделение его в металлическом виде». Так она станет первым ученым, дважды удостоенным высшей научной награды.

19 апреля 1906 г. на Марию обрушилось огромное горе: в результате нелепой случайности трагически погиб Пьер. Но удар судьбы не сломил Марию. Она продолжает научные исследования в области радиоактивности, возглавляет в Парижском университете кафедру, которой прежде руководил П. Кюри. В 1914 г. М. Склодовская-Кюри встает во главе физико-химического отдела Института радия, созданного в Париже при ее участии. В годы первой мировой войны она впервые организовала применение в широком масштабе излучений для медицинских целей, обучила более 1500 человек работе на рентгеновских установках.

Многие академии и научные общества разных стран мира избирали М. Склодовскую-Кюри своим почетным членом. В 1926 г. она была избрана почетным членом Академии наук СССР.

М. Склодовская-Кюри скончалась в 1934 г. от лучевой болезни. И до сих пор ее лабораторные тетради сохранили высокий уровень радиации.

В честь супругов Кюри получил свое название искусственно полученный *трансурановый элемент* с порядковым номером 96 — кюрий.

ни одного стабильного изотопа и были синтезированы искусственно. Периоды полураспада их изотопов значительно меньше возраста Земли. То же самое можно сказать про изотопы элементов от полония до протактиния (исключая торий). Их продолжительность жизни невелика, и то, что они и поныне встречаются на нашей планете, объясняется однозначно: это продукты последовательных радиоактивных превращений изотопов урана и тория.

Природные радиоактивные изотопы испытывают распад, сопровождающийся испусканием α- или β-частиц (в очень редких случаях отдельные изотопы проявляют оба вида радиоактивности; см. *Альфа-распад*, *Бета-распад*). В первом случае продуктом распада оказывается изотоп с Z на 2 меньше, чем у исходного; во втором — с Z на 1 больше. Эта закономерность, найденная в 1913 г. английскими учеными К. Фаянсом и Ф. Содди, носит название правила сдвига.

В 1940 г. советские ученые Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили новый вид радиоактивных превращений: спонтанное деление ядер (на примере ^{238}U). В процессе деления образуются осколки — изотопы элементов середины периодической системы с Z от 30 (цинк) до 64 (гадолиний). Испускание γ-лучей не приводит к превращениям элементов и потому не считается видом радиоактивных

ИРЕН ЖОЛИО-КЮРИ (1897 — 1956) ФРЕДЕРИК ЖОЛИО-КЮРИ (1900 — 1958)

Весной 1934 г. в «Докладах Парижской академии наук» появилась статья под названием «Новый тип радиоактивности». Ее авторы Ирен Жолио-Кюри (дочь известных ученых М. Склодовской-Кюри и П. Кюри) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри — обнаружили, что бор, магний и алюминий, облученные α-частицами, становятся радиоактивными и при своем распаде испускают позитроны (см. *Альфа-распад, Радиоактивность*). Так была открыта искусственная радиоактивность. За это открытие И. и Ф. Жолио-Кюри были удостоены в 1935 г. Нобелевской премии по химии.

Ирен и Фредерик начали свой путь в науке с исследования радиоактивных процессов. Окончив Парижский университет в 1920 г., Ирен уже в 1925 г. защитила докторскую диссертацию. Она работала в лаборатории своей матери М. Склодовской-Кюри, так же как и Фредерик после окончания Школы физики и прикладной химии. В 1934 г., после смерти М. Склодовской-Кюри, Ирен возглавила физико-химический отдел Института радия и ее кафедру в Парижском университете. В 1937 г. Фредерик стал руководить кафедрой ядерной химии в Коллеж де Франс, крупном учебном заведении страны.

Работы И. Жолио-Кюри по изучению продуктов облучения урана нейтронами сыграли большую роль в подготовке открытия деления урана (см. *Ядерные реакции*). Когда деление урана было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом, Ф. Жолио-Кюри одним из первых пришел к выводу, что оно сопровождается испусканием новых нейтронов и, следовательно, в уране возможно развитие *цепной реакции*. Он впервые поставил вопрос о практическом использовании ядерной энергии и с этой целью начал подготовку к конструированию ядерного реактора на тяжелой воде в качестве замедлителя нейтронов. Начавшаяся вторая мировая война и оккупация немцами Парижа приостановили эти работы. С риском для жизни сотрудники Жолио-Кюри вывезли в Англию запасы тяжелой воды и техническую документацию. И. и Ф. Жолио-Кюри остались во Франции, где принимали участие в движении Сопротивления.

После войны И. и Ф. Жолио-Кюри вели большую работу в Комиссариате по атомной энергии Франции. Уже в 1948 г. при их участии произведены запуски первого французского циклотрона и ядерного реактора.

И. и Ф. Жолио-Кюри избирались членами многих академий и научных обществ. В 1947 г. они стали членами-корреспондентами АН СССР.

И. и Ф. Жолио-Кюри были выдающимися общественными деятелями, участниками Всемирных конгрессов сторонников мира. С 1949 г. Ф. Жолио-Кюри возглавлял Всемирный Совет Мира. Он — один из первых лауреатов Международной Ленинской премии «За укрепление мира между народами». В 1950 г. Ф. Жолио-Кюри выступил инициатором знаменитого Стокгольмского воззвания в защиту мира.

Супруги Жолио-Кюри были большими друзьями нашей страны, часто ее посещали, имели разносторонние научные контакты с советскими учеными.

превращений. *Гамма-излучение* лишь сопровождает некоторые радиоактивные превращения, в которых конечные ядра образуются в возбужденных состояниях и переходят затем в основные состояния, испуская гамма-кванты. Таким образом, количество способов радиоактивного распада у природных радиоактивных изотопов весьма ограничено.

Тем не менее ныне известны и другие способы. Они были открыты (или теоретически предсказаны) после того, как в 1934 г. французские ученые И. и Ф. Жолио-Кюри наблюдали явление искусственной радиоактивности.

В результате *ядерных реакций* (например, при облучении различных элементов α-частицами или *нейтронами*) образуются радиоактивные изотопы элементов, в природе не существующие. Именно эти искусственные радиоактивные продукты составляют подавляющее большинство среди всех известных ныне изотопов. И. и Ф. Жолио-Кюри осуществили ядерную реакцию $^{27}_{13}Al(\alpha, n)^{30}_{15}P$, продуктом которой был радиоактивный изотоп фосфора с массовым числом 30. Выяснилось, что он испускал позитрон. Этот тип радиоактивных превращений называют β^+-распадом (подразумевая под β^--распадом испускание *электрона*). В ходе β^+-распада заряд ядра уменьшается на 1. Такое же изменение Z происходит при так называемом орбитальном захвате: некоторые ядра могут захватывать электрон с ближайших K- или (очень редко) L-оболочек (см. *Атом*). Это тоже вид радиоактивных превращений. Принято β^--, β^+-распады и ε-захват объединять под общим названием *бета-распада*. Теоретики уже давно предсказали возможность двойного β-превращения — 2β-распада, при котором одновременно испускаются два электрона или два позитрона. Но на практике этот путь «гибели» радиоактивного ядра пока не обнаружен. Зато недавно удалось наблюдать очень редкое явление протонной радиоактивности — испускание ядром *протона*. В 1982 г. было доказано существование двупротонной радиоактивности (предсказанной советским ученым В. И. Гольданским). Всем этим видам радиоактивных превращений подвержены только искусственные радиоизотопы, и в природе они не встречаются.

Радиоактивность характеризуется не только видом испускаемых частиц, но также и их энергией. Энергии испускаемых частиц могут достигать многих миллионов электронвольт, что в сотни тысяч и миллионы раз превосходит энергии химических процессов. Скорость радиоактивного распада подчиняется закону, выраженному формулой: $N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ (e — основание натуральных логарифмов, $e = 2,71828$). В этой формуле N_t — число атомов радиоактивного элемента в момент времени t, N_0 — в начальный момент времени; λ — постоянная радиоактивного распада. Зная ее, легко найти период полураспада: $T = ln2/\lambda$. Величины T для известных радиоизотопов колеблются в пределах от 10^{-3}с до 10^9 лет.

Радиоактивный распад — пример статистического, вероятностного процесса. Если у нас есть 100 радиоактивных атомов, то нет никакой возможности предсказать, когда и какой из них претерпит радиоактивное превращение. Распад данного атома может произойти в следующее мгновение, а может и через 10 минут, или через сутки, или через 100 лет. Радиоактивное превращение одного из атомов никак не влияет на превращения соседних атомов: процессы распада различных атомов протекают абсолютно независимо друг от друга. Бессмысленно говорить о периоде полураспада или времени жизни какого-то одного атома. Употребляя эти термины, мы имеем в виду усредненные величины, измеренные при наличии достаточно большого числа атомов данного изотопа.

РЕЗОНАНС

Водители автомобилей, проезжавшие утром 7 ноября 1940 г. по Такомскому висячему мосту длиной 855 м, переброшенному через Такомский пролив (США), оказались свидетелями необычного, на первый взгляд сверхъестественного явления. Несмотря на сравнительно небольшой ветер (~17 м/ с), проезжая часть изгибалась с частотой 36 колебаний в минуту. При этом амплитуда колебаний моста достигла 1,5 м.

Движение по мосту прекратилось, многие автомобили остались брошенными на мосту, так как водители отчаялись вывести их в безопасное место. Амплитуда колебаний возрастала. Лопнуло центральное крепление, после чего колебания моста изменили свой характер, их амплитуда резко увеличилась, и вскоре обломки моста рухнули в воды Такомского пролива.

Виновником трагического происшествия явился *резонанс* моста, вызванный вихрями воздуха, которые периодически отрывались от него под воздействием ветра. Частота отрыва этих вихрей совпала с одной из собственных частот колебаний моста, энергия ветра стала эффективно поглощаться колеблющейся системой, амплитуда колебаний недопустимо возросла, что и привело к разрушению этого гигантского сооружения.

Для того чтобы разобраться в явлении резонанса, обратимся к простейшему *гармоническому осциллятору* — грузику на пружине. Пока он совершает свободные колебания, его энергия, а значит, и амплитуда колебаний остаются постоянными, а период колебания T

определяется жесткостью пружины K и массой груза m: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$.

Приложим теперь к нему периодически изменяющуюся силу. Через некоторое время (переходной процесс) грузик станет следовать за вынуждающей силой, колеблясь с ее частотой, но со сдвинутой фазой; амплитуда его колебаний определится амплитудой вынуждающей силы и соотношением частоты вынуждающей силы ω и собственной частоты осциллятора

СВЯЗАННЫЕ МАЯТНИКИ

Опыт со связанными маятниками часто демонстрируется на уроках и лекциях. Мы советуем читателям проделать его самостоятельно.

Вбейте два гвоздя на расстоянии приблизительно 30 см друг от друга по горизонтали и прикрепите к ним маятники. Массу одного грузика возьмите равной $m_1 = 100$ г, а массу второго — $m_2 = 500$ г. Длину нити первого маятника выберите равной $l_1 = 1$ м, а длину второго маятника нужно будет изменять, допустим, так: $l_2 = 0{,}5$ м; 0,7 м; 1 м; 1,2 м; 1,5 м.

Возьмите медную проволоку диаметром около 0,3 мм и сделайте из нее мягкую пружинку длиной 30 см (например, навейте проволоку на обычный круглый карандаш и затем аккуратно снимите).

Теперь соберите всю «установку», как показано на рисунке.

Слегка раскачайте тяжелый (второй) маятник и предоставьте систему самой себе. Повторите опыт несколько раз, меняя длину нити тяжелого маятника. Как ведет себя при этом легкий (первый) маятник?

Когда разность длин нитей обоих маятников велика, колебания второго практически не влияют на первый. Когда же длины нитей сравнимы между собой, первый маятник начинает раскачиваться, причем раскачивается он то сильно, то слабо, потом снова сильно и снова слабо и т. д. Почему?

Очевидно, для передачи энергии от второго маятника к первому необходимо, чтобы толчки от пружинки происходили в такт с качаниями первого маятника. Это осуществляется при равенстве длин нитей маятников. В таком случае говорят, что наступил резонанс.

Обратите внимание на то, что амплитуда колебаний тяжелого маятника почти не меняется. Значит, он передает легкому маятнику лишь небольшую часть своей энергии.

Поменяйте маятники местами, т. е. первоначально раскачайте легкий маятник. Вы убедитесь, что резонанс будет выражен гораздо слабее (чем легче маятник, тем быстрее затухают его колебания). Проверьте это еще раз, воспользовавшись маятником с грузиком массой 20 г.

Наконец, подвесьте на одинаковых нитях одинаковые по массе грузики и раскачайте один из них. Вы увидите, что в этом случае оба маятника будут попеременно раскачиваться то сильно, то слабо, пока совсем не затухнут. Причем, если один колеблется с большой амплитудой, то второй — с малой, и наоборот. Колебания как бы перетекают от первого грузика ко второму и обратно.

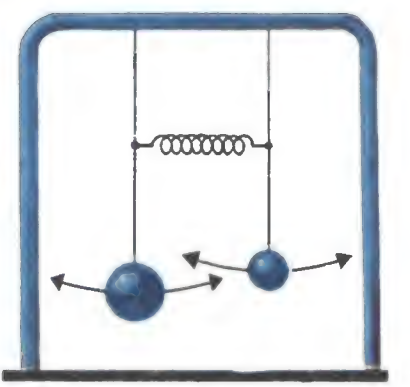
Оказывается, все дело в наложении колебаний. Маятники соединены слабой пружинкой, колебания которой передают энергию от одного маятника к другому и как бы регулируют эту передачу. Наложение таких двух колебаний называют биениями.

Интересно, что математические уравнения, которые описывают биения, недавно пригодились в... нейтринной физике. Советский ученый академик Б. М. Понтекорво предположил, что один сорт нейтрино (аналог первого маятника) может переходить в другой сорт (второй маятник), если в природе есть слабое взаимодействие (пружинка), связывающее эти сорта. И вот может оказаться, что *нейтрино*, летящие на Землю от Солнца, по дороге все время меняют свою природу. Происходит то же, что и с маятниками. Сейчас ученые во всем мире ставят эксперименты, чтобы выяснить, существуют ли осцилляции Понтекорво — процесс перехода одного сорта нейтрино в другой.

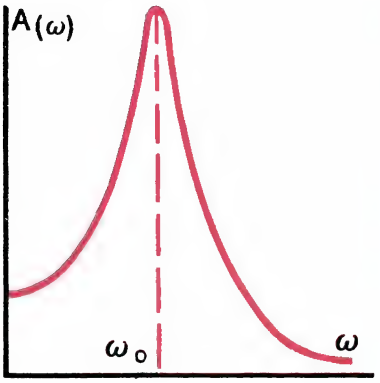
Следующий опыт потребует некоторого терпения.

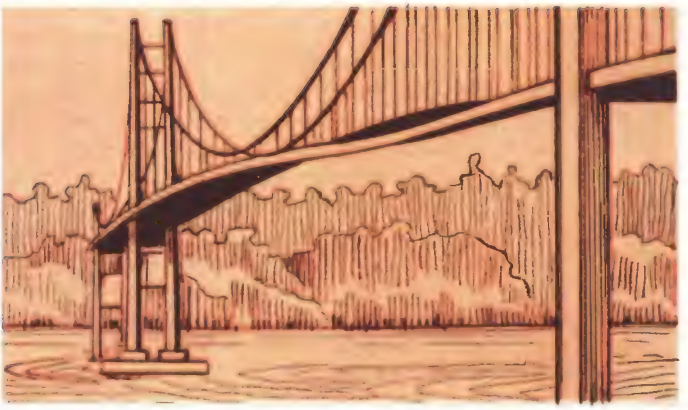
Изготовьте 5—6 одинаковых маятников и свяжите их одинаковыми пружинками. Приведите в движение первый маятник, и вы увидите, как постепенно колебания будут передаваться остальным маятникам — по цепочке маятников пробежит волна.

Такая система — простейшая модель одномерной кристаллической решетки.



Зависимость амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы при резонансе.





$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$. При приближении частоты ω к ω_0 грузик все более и более охотно следует за ведущей его периодической силой, сдвиг фаз колебания грузика и вынуждающей силы приближается к $\pi/2$, и, следовательно, направление его перемещения почти все время совпадает с направлением приложенной внешней периодической силы. Таким образом, внешней силой над грузиком все время совершается положительная работа, что приводит к значительному увеличению амплитуды его колебаний (см. рис.). Такое резкое возрастание амплитуды колебаний системы при приближении частоты вынуждающей силы ω к собственной частоте системы ω_0 называют *резонансом*.

Если в рассмотренной нами системе *трение* отсутствует, то амплитуда установившихся колебаний неограниченно возрастает по мере приближения ω к ω_0. На практике, однако, в любой системе имеются потери энергии. При значительном увеличении амплитуды колебаний они становятся заметными, и рассмотренная система теряет простые свойства *гармонического осциллятора*. Колебания станут нелинейными, и рост амплитуды прекратится. Максимальная амплитуда установившихся колебаний достигается при резонансе, т. е. при $\omega = \omega_0$.

Явление резонанса широко используется в различных областях физических явлений, а также в технике, например в радиотехнике. А в тех случаях, когда резонанс оказывается вредным, с ним стараются бороться.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

Релятивистская механика — механика, учитывающая законы *теории относительности*, изучающая законы *движения* тел со скоростями, близкими к скорости *света*. Ничего еще не зная об этих законах, сразу можно утверждать: необходимое (но отнюдь не достаточное) требование к релятивистской механике таково — при «малых скоростях» $v/c \ll 1$ законы релятивистской механики должны переходить в законы *механики* Ньютона. Основание для такого утверждения состоит в том, что законы механики Ньютона проверены на многовековом опыте. (Слова «малые скорости» взяты в кавычки, чтобы подчеркнуть относительность этого понятия. Скажем, 100 км/с в данном случае ничтожно малая скорость: $\frac{10^5 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 3 \cdot 10^{-3}$.)

Приведем основные уравнения релятивистской механики.

Второй закон Ньютона формально имеет тот же вид, что и в классической механике:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \qquad (1)$$

где $\vec{F}$ — сила.

Но в релятивистской механике формула, определяющая вектор *импульса*, выглядит так:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (1а)$$

Здесь m — масса покоя тела (масса в той системе, где тело покоится). Эта *масса* связана с энергией, «заключенной в теле», соотношением: $E = mc^2$.

Второе основное соотношение — формула для кинетической энергии:

$$E_{\text{кин}} = \left[\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 \right]. \qquad (2)$$

Прежде всего убедимся, что при $v/c \ll 1$ мы снова получим формулы ньютоновской механики. Для импульса это видно сразу. Пренебрегаем под корнем членом v^2/c^2 и имеем: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Если точно так же поступить с формулой (2), получим нуль. Значит, такое приближение слишком грубо. В этом случае обратимся к ма-

тематике и вспомним две следующие формулы.

Первая формула. Если $\alpha \ll 1$, то $\sqrt{1-\alpha} \approx \approx 1 - \frac{\alpha}{2}$ (с точностью до малых членов порядка α^2). Доказывается прямым возведением в квадрат правой и левой частей.

Вторая формула. Если $\beta \ll 1$, то $\frac{1}{1-\beta} \approx \approx 1 + \beta$. Опять это верно с точностью до членов порядка β^2. Доказывается приведением к общему знаменателю.

Тогда при $v/c \ll 1$

$$E_{\text{кин}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 \approx \frac{mc^2}{1-\frac{v^2}{2c^2}} - mc^2 \approx$$

$$\approx mc^2\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right) - mc^2 = \frac{mv^2}{2}.$$

В обоих случаях мы пренебрегали членами порядка v^4/c^4 и получали формулы ньютоновской механики.

Есть еще третья формула, связывающая полную энергию тела $E_{\text{полн}} = E_{\text{кин}} + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ непосредственно с импульсом:

$$E_{\text{полн}} = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}. \qquad (3)$$

Ее можно получить из первых двух формул с помощью простых арифметических расчетов. При $p \ll mc$ мы снова придем к формулам механики Ньютона.

Но если $v \sim c$ (хотя непременно $v < c$) законы релятивистской механики коренным образом отличаются от законов классической механики.

Например, как правило, вектор ускорения не параллелен силе. Это вытекает из формул (1) и (1а), но, чтобы получить этот результат, надо знать основы дифференцирования векторов. Ускорение $\vec{a} = d\vec{v}/d$ параллельно силе лишь в двух случаях — когда сила направлена параллельно скорости и когда она перпендикулярна скорости. Причем связь силы и ускорения различна.

В первом случае:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{a}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \qquad (4)$$

Во втором:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{a}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} \qquad (5)$$

В обоих случаях по мере приближения $|v|$ к c требуется все бóльшая сила для придания данного ускорения. И в первом и во втором случае сила стремится к бесконечности, когда $|v|$ стремится к c. Однако, как видно из формул (4) и (5), разгонять частицу труднее, чем заставить ее «свернуть с пути».

Из теории относительности следует, что каждая частица в состоянии покоя имеет энергию $E = mc^2$, причем эта энергия совершенно реальна. Ее можно использовать и необходимо учитывать.

Сегодня релятивистская механика во многом стала инженерной наукой. С ее помощью анализируют столкновения *элементарных частиц*, взаимодействие релятивистских частиц с веществом и вообще все процессы со скоростями, близкими к световой. Все современные *ускорители заряженных частиц* планируются и рассчитываются на основе релятивистской механики.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

В конце прошлого века профессор Вюрцбургского университета в Германии В. Рентген проводил опыты с *электрическим разрядом в газах*. Он использовал стеклянную трубку с впаянными в нее двумя электродами, откачанную до давления $\sim 10^{-5}$ от атмосферного. Когда на электроды подавалось высокое напряжение, стекло вокруг анода (положительного электрода) начинало светиться желто-зеленым светом. Это свечение физики объясняли действием так называемых катодных лучей, поток которых испускался катодом, падал на анод и частично на стенки трубки. Позднее было показано, что эти лучи состоят из отрицательно заряженных частиц — *электронов*.

Ноябрьским вечером 1895 г. Рентген, работая в лаборатории, обнаружил необычное явление. Для опытов он завернул разрядную трубку в черную бумагу, не пропускающую обычного света. В комнате было темно, и это позволило ученому заметить, что лежавшие недалеко от трубки кристаллы соли бария испускают слабый свет. Он снял с трубки напряжение, и свечение пропало. Тогда Рентген установил недалеко от нее экран, покрытый солью бария. Экран засветился. Ученый стал помещать между трубкой и экраном различные предметы. Картон, бумага, эбонитовая пластинка не влияли на яркость свечения. Металлические предметы отбрасывали на экран тень. Очевидно, трубка являлась источником неизвестных проникающих лучей. «*X*-лучей», как назвал их Рентген, или рентгеновских лучей, как называем их мы.

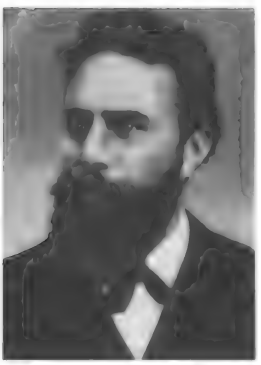
Исследователь поместил на пути *X*-лучей руку, и на экране появилось теневое изображение руки скелета — мягкие ткани были прозрачны для излучения, а кости почти не пропускали его.

Первая статья ученого — «О новом роде лучей», в которой он описывал свойства открытого им излучения, обошла буквально весь

мир и затем была напечатана отдельной брошюрой на всех европейских языках.

Однако объяснить природу загадочных лучей Рентген не смог. Он не знал о существовании *электронов*, а именно их торможение в стекле трубки было причиной появления рентгеновских лучей и зеленоватого видимого света. Когда заряженная частица влетает в вещество, она тормозится, теряет свою скорость и излучает *электромагнитные волны*. Диапазон длин волн рентгеновского излучения лежит в пределах от $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ до $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ м. На шкале электромагнитных волн они занимают место между ультрафиолетовым излучением и *гамма-излучением*. Пучок тормозящих электронов излучает волны с самыми разными длинами волн (λ). Эти волны образуют непрерывный рентгеновский спектр, но, кроме него, существуют и отдельные линии, в которые группируются волны с определенным значением λ. Природа их связана с тем, что падающие частицы ионизируют атом (см. *Ионизация*) и на образовавшиеся вакансии переходят электроны с более высоких энергетических уровней. При этом излучается квант с определенной энергией $h\nu$, или $h\frac{c}{\lambda}$. Когда свободный уровень образуется на внешних оболочках атома, излучается квант видимого света или ультрафиолетовых лучей; когда же это происходит на внутренних оболочках, то излучается квант с большей энергией и соответственно с мень-

ВИЛЬГЕЛЬМ КОНРАД РЕНТГЕН (1845 — 1923)



Вильгельм Рентген родился в маленьком немецком городке Леннепе вблизи германо-нидерландской границы. Учился в реальном училище в Утрехте, в Нидерландах, куда переехала его семья. Для получения высшего образования он отправился в швейцарский город Цюрих, где поступил на машиностроительный факультет Цюрихского политехникума. Там он изучал инженерные дисциплины. Но его все больше и больше захватывала физика, которой он решил посвятить свою жизнь. Рентген стал профессором физики и преподавал в ряде университетов Германии.

Его стихией был физический эксперимент. Мало кто мог сравниться с ним в продуманности опытов, в точности измерений и тщательности анализа возможных ошибок. Ученый выполнил множество исследований, в том числе чрезвычайно важных для молекулярной физики, *кристаллофизики* и *электродинамики*. Так, в 1890 г. он первый прямым опытом доказал, что движущиеся заряды создают магнитное поле.

Но всемирную славу ученому принесло знаменитое открытие «нового типа лучей», которые теперь называют *рентгеновскими*. Это произошло в ноябре 1895 г. в Вюрцбургском университете, ректором которого был Рентген. Именно уникальный талант физика-экспериментатора, редкая наблюдательность и твердое правило во всем добиваться ясности позволили Рентгену открыть явление, которое в течение многих лет было буквально «под руками» у множества его коллег, экспериментировавших с теми же самыми приборами. Пожалуй, ни одно из научных открытий того времени не вызвало столь огромного и всеобщего интереса, как обнаружение вюрцбургским профессором лучей, проходивших сквозь стены и позволявших видеть невидимое.

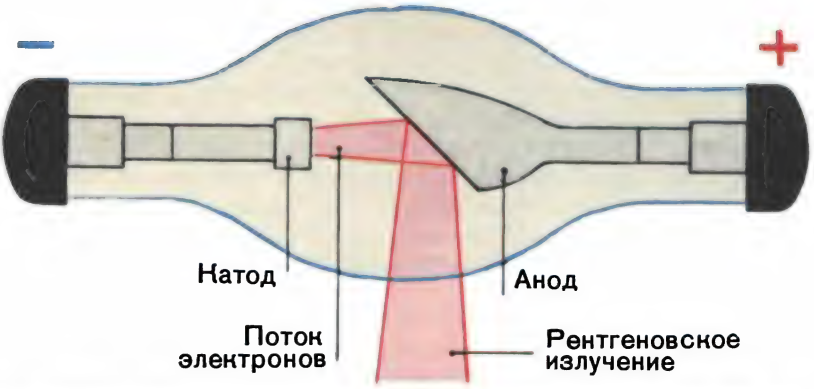
В 1901 г. Рентген стал первым ученым мира, получившим Нобелевскую премию по физике. Несмотря на мировую известность, он остался все таким же вдумчивым экспериментатором и очень скромным человеком. Открытые им лучи ученый всегда именовал *X*-лучами, неизменно отказываясь называть их своим именем.

Рентген способствовал практическому применению открытых им лучей в медицине.

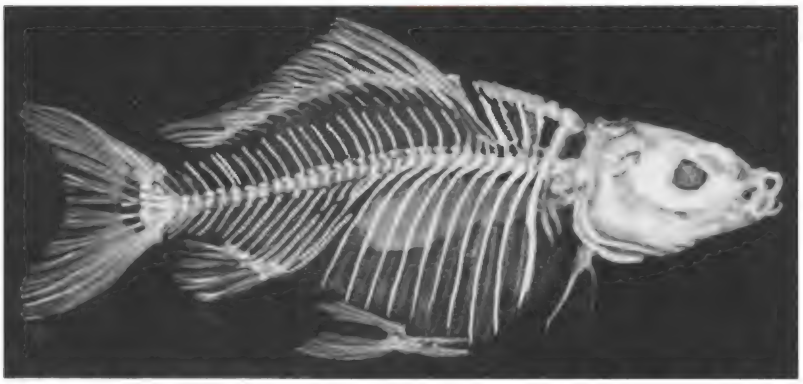
Замечательный физик-исследователь, Рентген был также и прекрасным педагогом, строгим, но благожелательным наставником молодых ученых, делавших свои первые шаги в науке. Его любимым учеником и сотрудником стал в начале 1900-х гг. А. Ф. Иоффе, будущий советский академик, воспитавший, в свою очередь, целую плеяду известных советских ученых.

В. Рентген посвятил свою жизнь классической физике. Но именно открытие им «нового типа лучей» явилось отправной точкой для развития новой физики — физики *атома* и *атомного ядра*. Менее чем через полгода после открытия *рентгеновских лучей* в ходе попыток разгадать их природу была открыта *радиоактивность*, а еще через год с их помощью был открыт *электрон*.

Схема рентгеновской трубки.



С помощью рентгеновских лучей можно увидеть многое невидимое для нас (например, скелет рыбы).



шей длиной волны, т. е. рентгеновский. Излучение это характеризует материал анода, который подвергается бомбардировке пучком электронов. Поэтому оно называется характеристическим излучением.

Применение рентгеновских лучей весьма разнообразно. Это медицина, в которой рентгеновские лучи применяются и для диагностики, и для лечения заболеваний. Затем физика, химия, биология, техника и даже криминалистика и искусствоведение.

Рентгеновское излучение обладает столь малой длиной волны, что в качестве дифракционной решетки (см. *Дифракция*) для него можно использовать кристалл: ведь расстояние между атомами кристалла составляет $10^{-9} \div 10^{-10}$ м. Проходя сквозь кристалл или отражаясь от него, рентгеновские лучи дают на фотопластинке характерную картину дифракции. Исследуя ее, физики получают важные сведения о структуре вещества — проводят рентгеноструктурный анализ.

1962 год можно считать годом рождения рентгеновской астрономии. *Детекторы ядерных излучений* поднимались сначала на ракетах, а затем на искусственных спутниках. Исследовалось рентгеновское излучение Солнца и звезд, не проникающее сквозь земную атмосферу. Было открыто множество космических объектов — рентгеновских излучателей.

Но, пожалуй, главным открытием в этой области стало обнаружение рентгеновских пульсаров. Ученые представляют себе такой пульсар как систему из двух звезд, одна из которых является нейтронной. Радиус нейтронной звезды всего $10 \div 30$ км, а масса звездная, так что плотность вещества в ней достигает $10^{11} \div 10^{15}$ г/см^3. При такой плотности *электроны* «вдавлены» в ядра и вместе с *протонами* образуют *нейтроны*. Вторая звезда обычно — газовая. В процессе взаимного движения нейтронная звезда «перетягивает» на себя вещество своей спутницы, и ее поверхность бомбардируется частицами, подобно аноду в рентгеновской трубке. Это и приводит к возникновению излучения. А пульсирует оно во времени из-за того, что система вращается (причем с огромной скоростью) и вместе с ней вращается гигантский луч «рентгеновского прожектора».

Очевидно, что открытие рентгеновских лучей сыграло важную роль в истории физики. За ним последовали новые исследования и научные достижения, которые привели к формированию современных взглядов на строение *атомов* и квантовую теорию *материи*.

С

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

При *низких температурах* некоторые *металлы* и сплавы — с в е р х п р о в о д н и к и — перестают оказывать сопротивление *электрическому току*. По замкнутой цепи сверхпроводящий ток может циркулировать сколь угодно долго, без потерь. Это явление было открыто нидерландским ученым Х. Камерлинг-Оннесом еще в 1911 г., но получило теоретическое обьяснение лишь в 1957 г. в работах американских ученых Дж. Бардина, Л. Купера, Дж. Шриффера, а также советского ученого Н. Н. Боголюбова. Таким образом, к раскрытию тайны сверхпроводимости ученые-физики продвигались около 50 лет. Это едва ли не единственный пример в современной физике, когда экспериментальное открытие и его теория разделены столь большим промежутком времени.

Существенный шаг к пониманию сверхпроводимости был сделан после открытия явления *сверхтекучести* и создания теории сверхтекучести советским физиком Л. Д. Ландау. Стало ясно, что сверхпроводимость — это сверхтекучесть электронной жидкости. Однако трудность на пути к окончательному пониманию этого явления заключалась в том, что в сверхтекучее состояние может переходить только коллектив частиц, каждая из которых обладает целым *спином*. У *электронов* же спин равен 1/2.

В современной теории явление сверхпроводимости объясняется образованием в металле коллектива электронов, состоящего из к у п е р о в с к и х п а р (парные объединения электронов называют так по имени американского физика Л. Купера, впервые высказавшего в 1956 г. эту идею). В каждой паре спины электронов направлены противоположно, и суммарный спин пары равен нулю. В таком коллективе, так же как в сверхтекучем гелии, мириады микрочастиц движутся согласованно, и законы *квантовой механики* проявляются здесь в макроскопических масштабах. Столкновения отдельных электронов с кристаллической решеткой становятся невозможными, а затормозить весь коллектив электронов кристаллической решетке не так просто. Энергия этой квантовой системы не может уменьшаться непрерывно, а должна меняться только сразу на конечную величину, скачком. Поэтому сверхпроводящие пары электронов могут до определенной скорости двигаться в металле без *трения*.

Почему же в сверхпроводнике электроны объединяются в пары? Ведь по з а к о н у К у л о н а они должны отталкиваться. Оказалось, что причина — во взаимодействии электронов с кристаллической решеткой. Электроны притягивают к себе ионы кристаллической решетки и как бы обрастают «шубой» из положительных зарядов. В результате знак взаимодействия между электронами может измениться, и они будут притягиваться.

Сверхпроводник не только идеальный проводник, но и идеальный диамагнетик (см. *Магнетизм*). Магнитное поле полностью выталкивается из сверхпроводника (э ф ф е к т М е й с н е р а). Если к сверхпроводнику поднести магнит, то по поверхности сверхпроводника потекут незатухающие т о к и Ф у к о, которые экранируют магнитное поле в сверхпроводнике. Магнитное поле токов по п р а в и л у Л е н ц а препятствует приближению магнита к сверхпроводнику. Поэтому магнит повисает над сверхпроводником. Принцип сверхпроводящей магнитной подвески используется в экспериментальных железнодорожных линиях, уже созданных в Японии (достигнута скорость поезда 516 км/ч) и проектируемых в ФРГ, Франции и СССР.

В сильных магнитных полях сверхпроводимость разрушается, и магнитное поле проникает в металл. Наибольшие поля выдерживают сверхпроводящие сплавы, в которых разрушение сверхпроводимости происходит постепенно. Как было показано советским ученым А. А. Абрикосовым, магнитное поле проникает в сплавы и сверхпроводники с большим коли-

Проникновение магнитного поля в сверхпроводящее кольцо с джозефсоновским элементом.

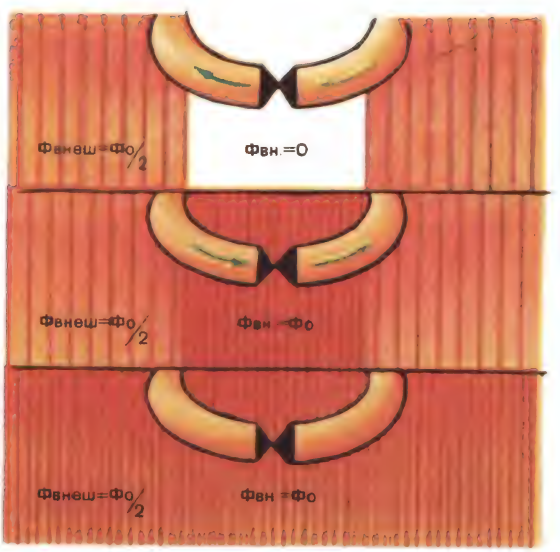
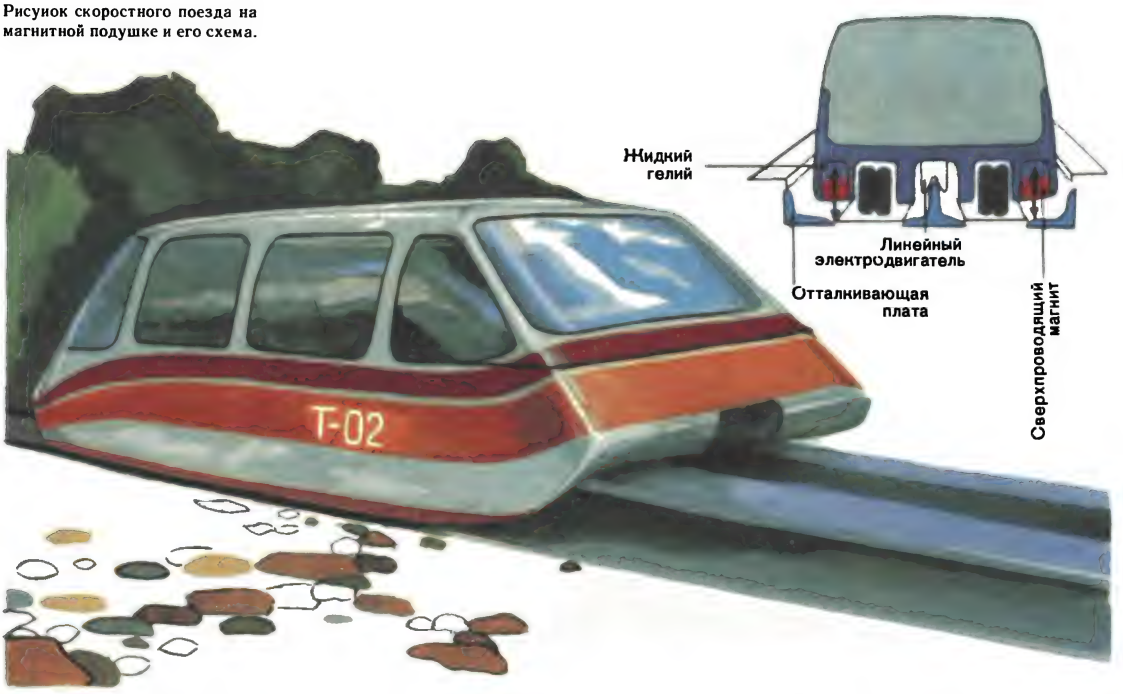


Рисунок скоростного поезда на магнитной подушке и его схема.



чеством примесей в виде отдельных сгустков силовых линий (абрикосовских вихрей). На фотографии, полученной с помощью электронного микроскопа, можно увидеть периодическую решетку, которую образуют абрикосовские вихри на поверхности сверхпроводящего сплава. Для этого нужно нанести на поверхность мельчайшие ферромагнитные частицы, которые скапливаются в тех местах, куда проникло магнитное поле.

Абрикосовские вихри квантовые, в каждом содержится строго определенная порция магнитного потока — квант потока $\Phi_0 = 2{,}07 \cdot 10^{-15}$ Вб. При увеличении магнитного поля увеличивается число вихрей, но пространство между вихрями остается сверхпроводящим. Только при очень большом поле вихри сливаются, и металл переходит в нормальное состояние.

Сверхпроводящие сплавы, выдерживающие магнитные поля более десятка тесла, широко применяют для создания сильных магнитных полей. Достаточно сделать из такого сплава проволоку, намотать катушку, замкнуть ее накоротко и, охладив до низких температур, возбудить ток. Сверхпроводящие обмотки используют в установках управляемого *термоядерного синтеза*, в мощных электрических моторах и генераторах.

Представляется заманчивым использование сверхпроводимости для передачи электрической энергии без потерь (сверхпроводящие кабели). Такие экспериментальные линии уже созданы, но в настоящее время они нерентабельны из-за больших затрат на охлаждение до гелиевых температур.

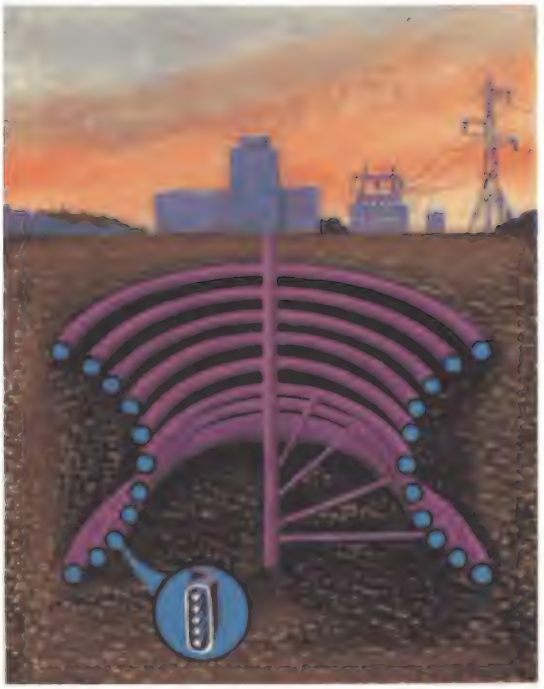
Сверхпроводимость нашла важное применение в криоэлектронике («криос» в переводе с греческого «холод»), так как компактные устройства значительно легче охлаждать до низких температур. Эти устройства основаны на *Джозефсона эффекте* и явлении квантования магнитного потока. На помещенном здесь рисунке дана картина проникновения магнитного поля в сверхпроводящее кольцо, содержащее джозефсоновский элемент. Вначале сверхпроводящий ток экранирует внешнее поле, однако, когда его величина становится больше критического значения, магнитные силовые линии проникают в контур через слабое место — джозефсоновский элемент. При этом магнитный поток внутри кольца скачком возрастает на величину кванта потока Φ_0.

Такие резкие изменения магнитного потока легко обнаружить, например, по ЭДС индукции, наводимой в измерительной катушке. Таким образом, система может «чувствовать» отдельные кванты потока, а ведь квант потока Φ_0 — очень маленькая величина. На этом принципе создано целое семейство сверхчувствительных измерительных приборов — СКВИДов (сверхпроводящие квантовые интерференционные детекторы), позволяющих измерять магнитное поле с точностью до $\sim 10^{-18}$ Тл, а напряжения — до 10^{-15} В.

В последнее время СКВИДы нашли применение в медико-биологических исследованиях, так как с их помощью удается измерить магнитные поля, возникающие при работе сердца и мозга.

Наконец, необходимо упомянуть о разраба-

Проект сверхпроводящего накопителя электрической энергии. Установка содержит сообщающиеся каналы со сверхпроводниками, куда из холодильного устройства накачивается жидкий гелий.



тываемых проектах сверхпроводящих электронных вычислительных машин. Вводя в сверхпроводящее кольцо с элементом Джозефсона отдельные кванты потока, можно записывать информацию, причем такой элемент памяти обладает большими преимуществами: малым временем переключения $\sim 10^{-11}$с и ничтожным выделением тепла $\sim 10^{-18}$ Дж. Уже созданы компактные интегральные схемы, содержащие многие тысячи таких элементов на 1 см^2, и недалек тот день, когда заработает первая сверхпроводящая ЭВМ.

Возможности использования сверхпроводимости значительно расширятся, если удастся найти вещества, которые обладают этим свойством при не слишком низких температурах. Тогда для охлаждения можно будет использовать, например, сравнительно дешевый жидкий азот. В этом направлении во всем мире проводится огромная научно-исследовательская работа, однако сегодняшний рекордсмен — сплав Nb_3Ge остается сверхпроводящим лишь до 22,4 К.

Была высказана идея об усилении сверхпроводимости в веществах, состоящих из длинных органических молекул. Однако синтезированные сейчас органические металлы становятся сверхпроводящими лишь при очень низких температурах. Возможным кандидатом на роль высокотемпературного сверхпроводника является и металлический водород (в эту модификацию водород должен переходить при очень высоких давлениях, порядка нескольких миллионов атмосфер). Но все это пока из области фантазии. Поиск высокотемпературных сверхпроводников продолжается. Их обнаружение может привести к грандиозной технической революции, которую заранее даже трудно себе представить.

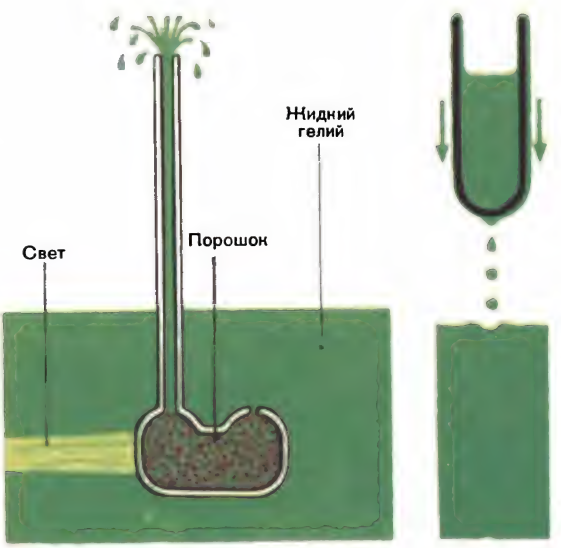
СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ

Это свойство квантовых жидкостей — течь без *трения*. Впервые обнаружено в 1938 г. советским ученым П. Л. Капицей в жидком гелии. При температуре ниже 2,17 К вязкость гелия обращается в нуль, и он свободно протекает через очень узкие капилляры. Теоретическое объяснение явления сверхтекучести было дано в 1941 г. советским ученым Л. Д. Ландау. Атомы жидкого гелия образуют единую квантовую систему, энергию и импульс которой можно изменить только сразу на конечную величину, скачком. Поэтому до определенной скорости жидкий гелий течет без трения, не замечая препятствий, — обладает свойством сверхтекучести.

В жидком гелии много чудес. Он как бы состоит из двух жидкостей, которые могут течь независимо, никак не мешая друг другу. Одна жидкость сверхтекучая, она не имеет вязкости, вторая нормальная. Относительное содержание нормальной компоненты зависит от температуры: при абсолютном нуле весь гелий сверхтекучий, а при критической температуре 2,17 К остается одна нормальная жидкость. Через узкие капилляры течет только сверхтекучая компонента. А вот для того, чтобы потекла нормальная компонента, оказывается достаточно создать в гелии разность температур.

Эксперимент с капиллярной трубкой, погруженной в жидкий гелий.

Образование пленки сверхтекучего гелия на поверхности сосуда.



Предположим, что мы нагрели гелий в каком-то месте. Тогда там увеличится плотность нормальной компоненты. Поэтому сверхтекучая часть устремится в нагретое место, а нормальная — потечет в обратном направлении, чтобы выровнять концентрации и восстановить постоянство температуры. На этом основан очень красивый эксперимент. Капиллярная трубка, нижний конец которой расширен и содержит темный порошок, погружается в жидкий гелий. При облучении светом порошок нагревается, нормальная компонента гелия вытекает в ванну, а в обратном направлении устремляется сверхтекучий гелий, который бьет фонтаном (высотой до 30 см) из открытого конца трубки.

Благодаря сверхтекучести уровень гелия даже в несообщающихся сосудах всегда выравнивается. Это происходит потому, что поверхность сосуда покрывается очень тонкой пленкой гелия (толщиной примерно 100 атомных слоев), которая движется без *вязкости*. В результате если пробирку с гелием поднять над уровнем жидкости, то весь гелий из нее обязательно вытечет.

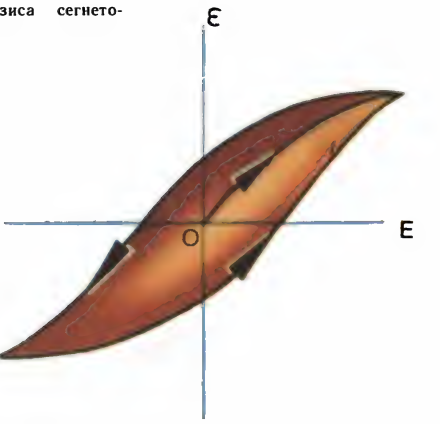
Сверхтекучесть является коллективным эффектом. Атомы гелия имеют целый (нулевой) *спин* и поэтому скапливаются в одинаковых состояниях. В результате квантовые свойства каждой частицы усиливаются.

В системах же, состоящих из частиц с полуцелым спином, например, *электронов, нейтронов* или *протонов*, действует *принцип Паули*, напротив, запрещающий частицам находиться в одинаковых состояниях. В таких системах обычно сверхтекучесть не наблюдается. Однако и в этом случае возможно объединение частиц в пары, которые обладают целым спином и переходят в сверхтекучее состояние. Так спаривание свободных электронов в металле приводит к переходу электронной жидкости в сверхтекучее состояние. В результате электрический ток может течь без потерь (см. *Сверхпроводимость*). Атомы изотопа гелия He^3 состоят из трех частиц (двух протонов и одного нейтрона), так что общий спин атома полуцелый. Поэтому в обычных условиях He^3 нормальная жидкость, и лишь при очень низких температурах, порядка тысячной доли градуса Кельвина, происходит спаривание атомов и переход в сверхтекучее состояние.

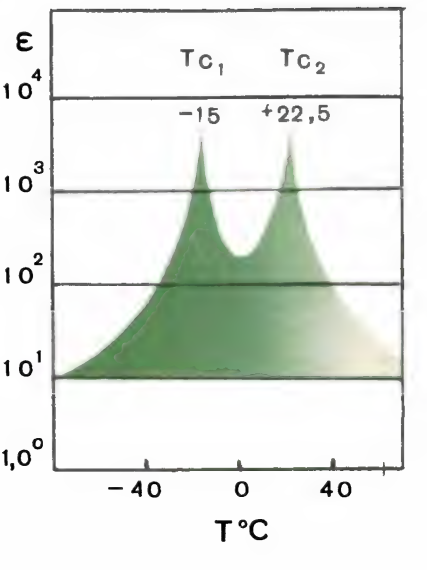
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектриками называют кристаллические вещества, обладающие рядом необычных диэлектрических свойств, и в первую очередь способностью к самопроизвольной электрической поляризации, которая может возникать даже в отсутствие внешнего поля. Впервые эти свойства были обнаружены советскими физиками И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко при исследовании кристаллов сегнетовой соли ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) — отсюда и возникло название для этого класса *диэлектриков*. В дальнейшем оказалось, что подобными свойствами обладают и некоторые другие кристаллы, — например титанат бария, танталат лития, дигидрофосфат калия. Сегнетоэлектрики характеризуются анизотропией своих диэлектрических свойств (их неодинаковостью по различным направлениям внутри этих веществ). Так, если электрическое поле приложено вдоль определенных кристаллических осей, то диэлектрическая постоянная ε в некоторой области температур начинает сильно зависеть от напряженности поля и достигает огромных значений $\varepsilon \sim 10\,000$. Кроме того, величина ε зависит от предшеству-

Петля гистерезиса сегнетоэлектрика.



Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры для сегнетовой соли. T_{c_1} и T_{c_2} — точки Кюри.



Домены в сегнетоэлектрике.

ющего состояния диэлектрика. Температура, ограничивающая область сегнетоэлектрических свойств диэлектрика, называется точкой Кюри. При более высоких температурах сегнетоэлектрические свойства веществ исчезают. У некоторых сегнетоэлектриков их необычные свойства ограничены по температуре и сверху, и снизу — есть две точки Кюри.

В чем же причина сегнетоэлектрических свойств диэлектриков? Оказывается, кристаллическая структура сегнетоэлектриков такова, что взаимодействие входящих в их кристаллы молекул приводит к упорядоченной ориентации их дипольных (см. *Диполь*) электрических моментов, и происходит, как говорят, самопроизвольная поляризация диэлектрика. Это и есть основное свойство, отличающее сегнетоэлектрики от других диэлектриков. В кристалле самопроизвольно возникают малые области с одинаковым направлением дипольных моментов. Их называют доменами. Дипольные моменты отдельных доменов ориентированы случайным образом так, что результирующий момент всего кристалла равен нулю. Только под действием внешнего электрического поля $\vec{E}$ электрические дипольные моменты доменов устанавливаются в одном направлении по вектору $\vec{E}$. В целом поведение сегнетоэлектриков в электрическом поле сходно с поведением ферромагнетиков в магнитном (см. *Магнетизм*). По этой причине иногда сегнетоэлектрики называют ферроэлектриками.

Сегнетоэлектрики имеют важное практическое применение. Емкость конденсатора пропорциональна ε диэлектрика, помещенного между его обкладками. Поэтому, используя диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью ε, можно построить малогабаритные конденсаторы большой емкости. Однако сегнетова соль для этой цели не подходит: высокое значение ε у нее сохраняется в интервале температур от $-18°$ до $24°$ С. Конденсаторы же должны работать в гораздо более широком температурном диапазоне. В технике применяют сегнетоэлектрические конденсаторы на основе титаната бария, у которого точка Кюри около 133° С, а ε достигает 6000—7000.

СИЛА

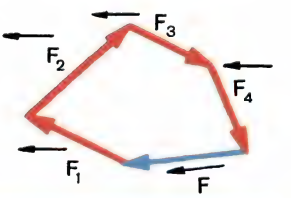
В своем классическом труде «Математические начала натуральной философии», представленном Лондонскому королевскому обществу в 1687 г., И. Ньютон ввел важнейшее понятие «приложенной силы», определяющей ускорение тела: «Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы».

И. Ньютон был не первым ученым, понявшим, что причина *движения* кроется во взаимодействии тел. Еще немецкий астроном И. Кеплер в XVII в. ввел понятие силы как причины движения тел, однако он ошибочно измерял ее скоростью движения тела. Г. Галилей в отличие от Кеплера уже измерял силу вызванным ею ускорением, но полностью отождествлял ее с весом тела.

В современной физике под силой понимают физическую величину, являющуюся мерой взаимодействия материальных тел. Это взаимодействие может происходить либо путем непосредственного контакта тел (удар, *трение*), либо посредством создания взаимодействующими телами силовых полей (поле тяжести, электромагнитное поле, поле ядерных сил).

Поскольку воздействие одного тела на другое имеет направленный характер, то и сила является векторной величиной. Линией действия силы $\vec{F}$ называют прямую, вдоль которой направлен вектор этой силы. Действие

Результирующая сила $\vec{F}$ является векторной суммой сил $\vec{F}_i$.

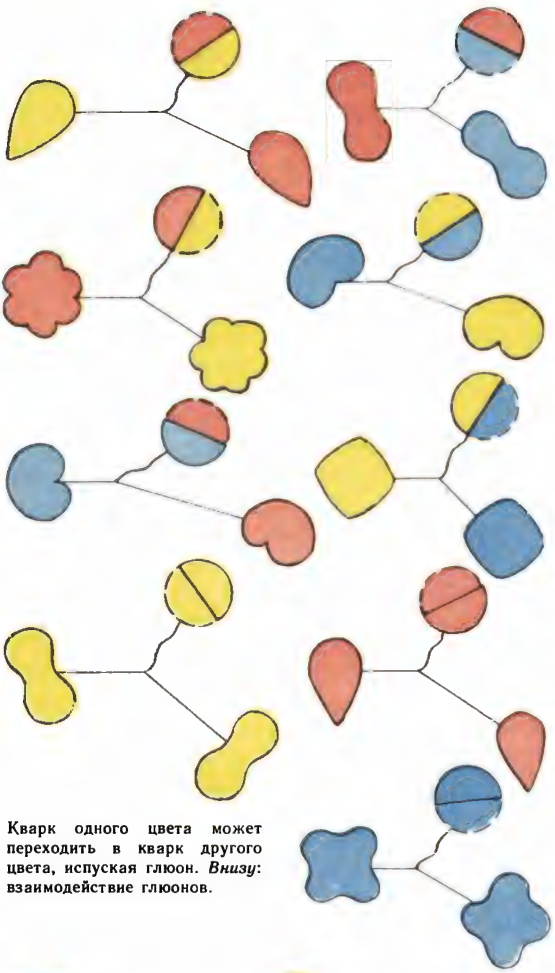


Кто сильнее?

нескольких тел на материальную точку с силами $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, ..., $\vec{F}_n$ эквивалентно действию одной силы, равной векторной сумме этих сил: $\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$. Такая сила $\vec{F}$ называется равнодействующей.

Зная начальные положения и скорости входящих в систему тел, с помощью законов Ньютона можно предсказывать их поведение при приложении к ним тех или иных сил. Однако эти законы не могут открыть нам природу данных сил. Их происхождение и свойства изучаются в других разделах физики.

Несмотря на кажущееся обилие и разнообразие существующих в природе сил, можно выделить всего четыре фундаментальных типа взаимодействия — гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия (см. *Единство сил природы*).



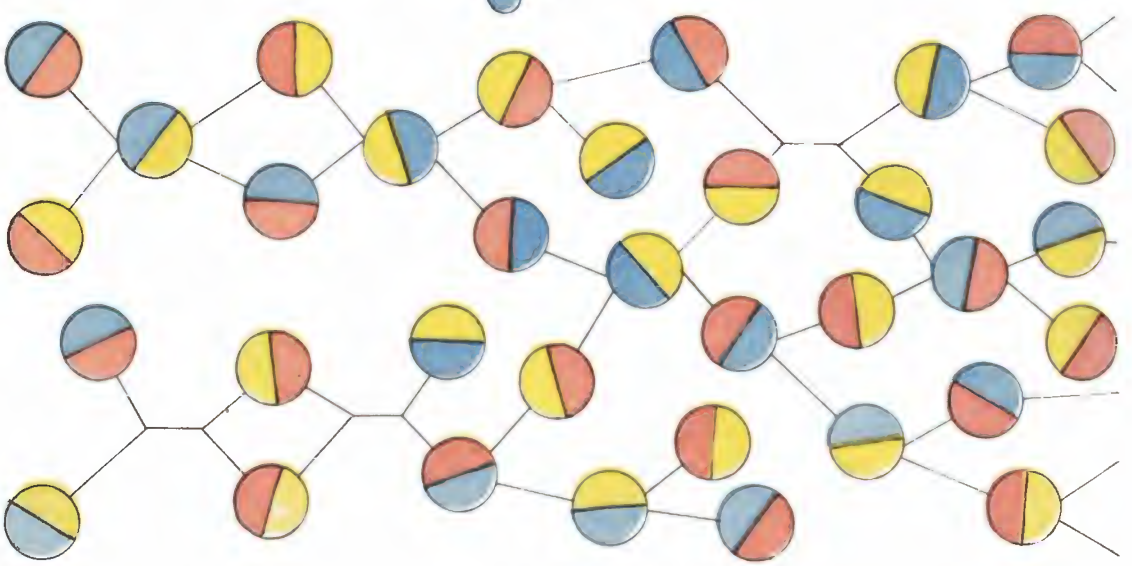
Кварк одного цвета может переходить в кварк другого цвета, испуская глюон. *Внизу*: взаимодействие глюонов.

СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В начале нашего века в опытах английского физика Э. Резерфорда были обнаружены *атомные ядра*. Так возникла ядерная физика — наука, имеющая большое влияние на цивилизацию. Огромная ядерная энергия может служить человечеству, а может и стереть его с лица Земли.

Пока удалось использовать лишь ничтожную долю потенциальной энергии ядерных сил. Этими силами удерживаются внутри ядра нуклоны — *протоны* и *нейтроны*.

Природа ядерных сил долго оставалась загадкой. Свыше полувека физики искали поле, «ответственное» за ядерные силы, подобно тому как электромагнитное поле «ответственно» за кулоновские силы между зарядами (см. *Электростатика*). Было найдено множество новых короткоживущих частиц — *адронов*, но ни одна из них не смогла сыграть той сольной роли, как *фотон* — квант электромагнитного поля.



До недавнего времени казалось, что такую роль может сыграть π-мезон (пи-мезон) — легчайший из адронов. Японский физик Х. Юкава предложил теорию ядерных сил, основанную на мезонном поле. В этой теории нуклоны создают вокруг себя мезонное поле, аналогичное электромагнитному полю зарядов. Это поле по-разному действует на протон и нейтрон и, кроме того, взаимодействует с их *спином*.

Нуклоны могут поглощать и испускать кванты этого поля — π-мезоны, подобно тому как электрические заряды могут испускать и поглощать фотоны.

В отличие от электромагнитных сил ядерные силы действуют только на малых расстояниях — меньше 10^{-13} см. В теории Юкавы ядерные силы экспоненциально (т. е. по закону $y = e^x$) убывают с ростом расстояния между нуклонами, когда это расстояние превышает так называемый комптоновский радиус π-мезона $\hbar/mc$, где m — масса π-мезона, $\hbar$ — постоянная Планка, c — скорость света.

Другое отличие ядерных сил от электромагнитных — это их величина. На расстояниях меньше или порядка 10^{-13} см ядерные силы в сотни раз превышают электромагнитные. Этим и объясняется малый размер *ядра* по сравнению с размером *атома* — ядерные силы притягивают друг к другу нуклоны на расстоянии больше или порядка 10^{-13} см, в то время как более слабые кулоновские силы притягивают к ядру электронные оболочки на расстоянии больше или порядка 10^{-8} см.

Теория Юкавы объяснила основные ядерные явления, но не смогла объяснить структуру самих нуклонов. Из чего они состоят?

Эксперименты по глубоко неупругому (т. е. с большой передачей импульса) рассеянию *электронов* на *протонах*, проведенные в конце 1960-х гг., показали, что внутри протона имеются точечные электрические заряды. Теория Юкавы никак не могла объяснить эти опыты — она, напротив, предсказывала однородную структуру протона, без каких-либо крупинок. Вскоре стало ясно, что наблюдаемые сгустки — это фундаментальные частицы, из которых состоят мезоны и нуклоны и гипотезу о существовании которых предложили в 1964 г. независимо друг от друга американский физик М. Гелл-Ман и австрийский физик Г. Цвейг. М. Гелл-Ман назвал их *кварками*. Уникальным свойством сил между кварками является так называемая асимптотическая свобода. Эти силы ослабляются на малых расстояниях или (по *соотношению неопределенностей*) в процессах с большой передачей импульса. Поэтому в таких процессах кварки выступают как точечные объекты, не окруженные полем (см. *Поля и частицы*). Теоретически доказано, что для асимптотической свободы необходимы специальные переносчики сил — глюоны (от английского слова, означающего «клей»).

Имеются три типа кварков, которые условно различают тремя «цветами». Кварк одного «цвета» может переходить в кварк другого «цвета», испуская глюоны. Оказывается, возможны восемь различных глюонов.

Важное свойство глюонов, отличающее их от квантов света — *фотонов*, — способность излучать друг друга; это, можно сказать, «светящийся свет». Можно представить для наглядности два скрещенных прожектора, которые дают три, а не два луча после столкновения.

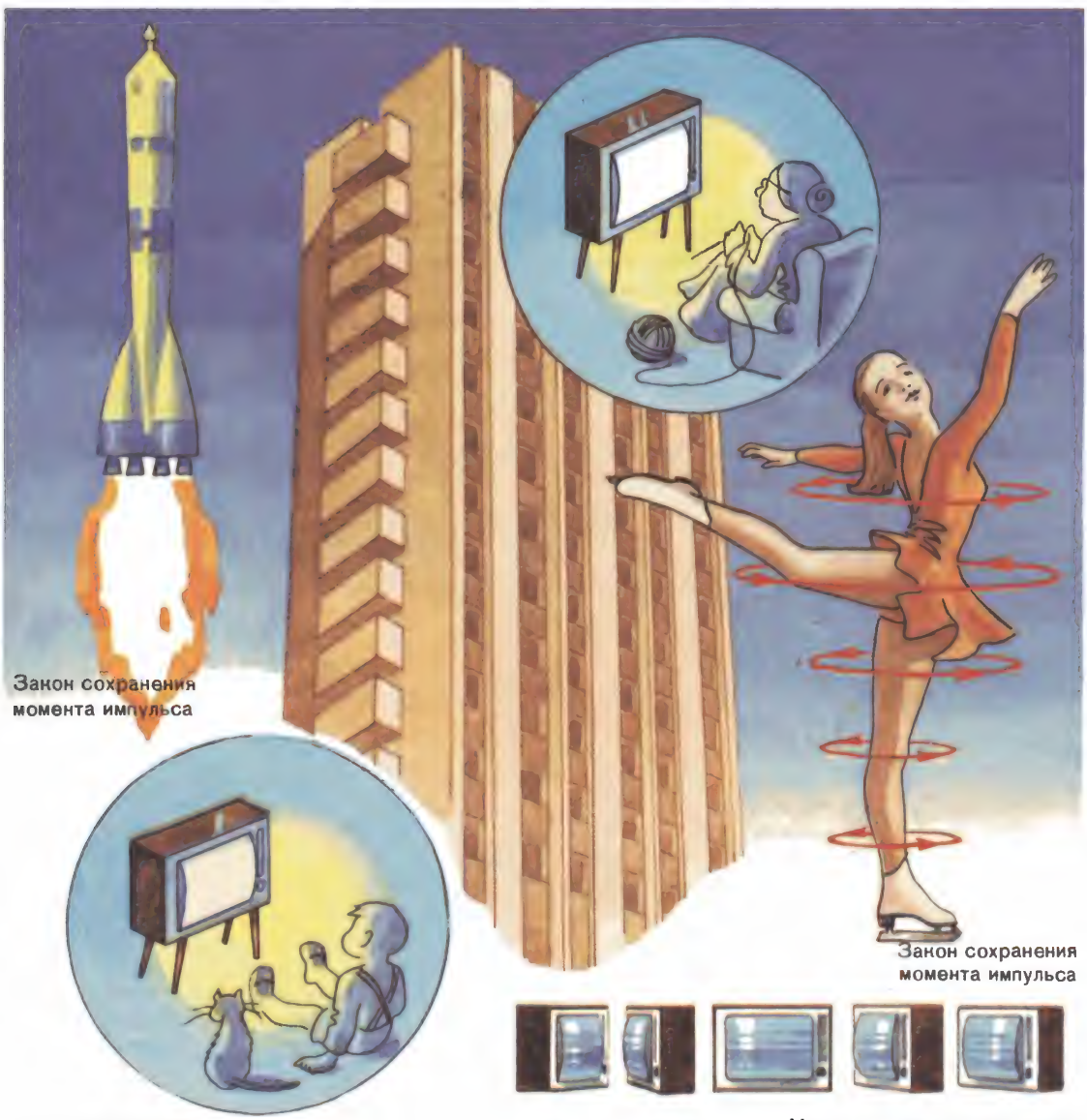
Теория кварков и глюонов была названа квантовой хромодинамикой (от греческого слова «хрома» — «цвет»). Она хорошо согласуется с опытом в области малых расстояний, где силы невелики. Предполагается, что в области «больших» расстояний (10^{-13} см) эти силы возрастают и это приводит к удержанию кварков и глюонов внутри адронов. Количественная теория данного удивительного явления пока еще не построена, но довольно много его свойств стало понятно в последнее время. По-видимому, глюонное поле сжимается в пустоте в трубку, и это означает невозможность существования кварка в свободном виде, ведь трубка несет энергию, пропорциональную длине. Если такая трубка будет тянуться от кварка сколь угодно далеко, то ее энергия сделает одиночный кварк бесконечно тяжелым. Но этого, конечно, не произойдет. Кварк найдет себе с помощью этой трубки партнеров — либо еще два кварка, либо антикварк. Если трубка соединяет партнеров, которые находятся близко друг от друга, то энергия будет невелика. Согласно этой модели, так происходит внутри протона, мезона и других адронов. Так ли это на самом деле? На этот вопрос науке предстоит ответить в будущем.

СИММЕТРИЯ ЗАКОНОВ ПРИРОДЫ

Что такое симметрия? Обычно под этим словом понимают либо зеркальную симметрию, когда левая половина предмета зеркально симметрична правой, либо центральную, как, например, у пропеллера. В этом понимании симметрия означает неизменность предмета при отражении в зеркале или при отражении в центре. Но вернем слову его первоначальное значение — «соразмерность» — и будем понимать под ним неизменность не только предметов, но и физических явлений, и не только при отражении, но и вообще при какой-либо операции — при переносе установки из

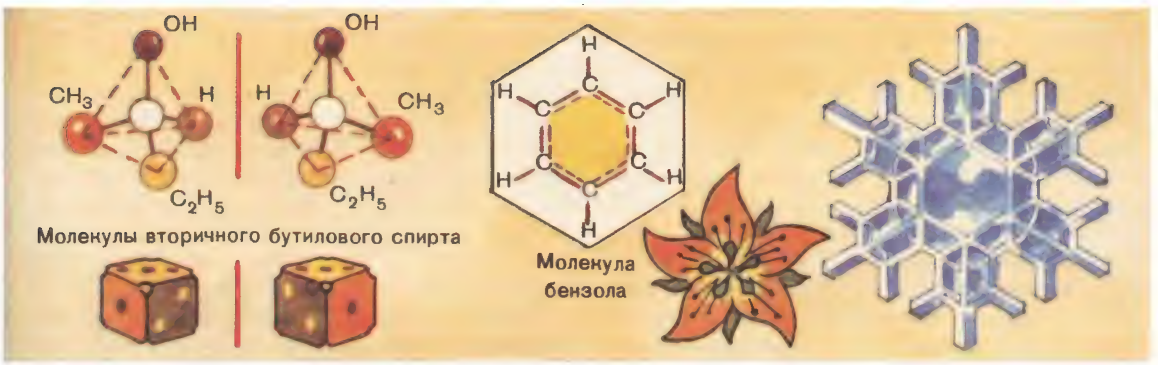
Примеры симметрии законов природы.

Примеры зеркально-симметричных объектов



Однородность пространства (перенос с этажа на этаж не отражается на работе телевизора)

Изотропность пространства (поворот телевизора не отражается на его работе)

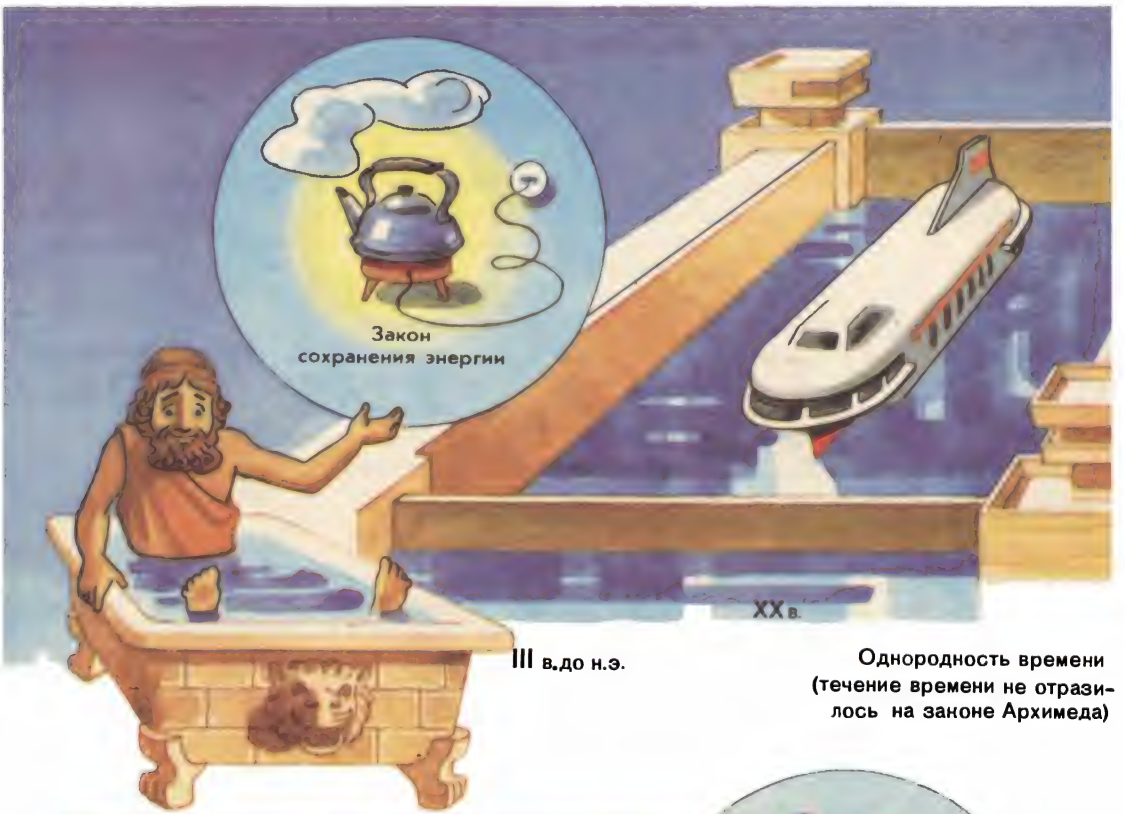


Молекулы вторичного бутилового спирта

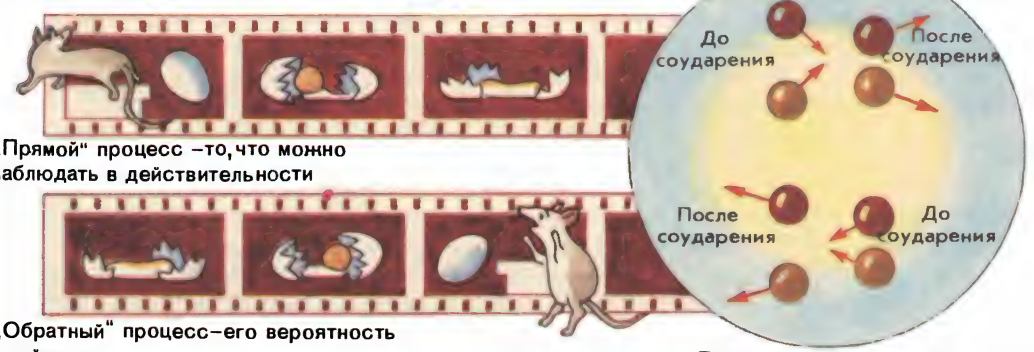
Молекула бензола

Примеры зеркально-асимметричных объектов

Примеры центрально-симметричных объектов



Однородность времени (течение времени не отразилось на законе Архимеда)



„Прямой" процесс – то, что можно наблюдать в действительности

„Обратный" процесс – его вероятность крайне мала

В микромире „прямые" и „обратные" процессы равновероятны

Обратимость времени

одного места в другое или при изменении момента отсчета времени. Для проверки, скажем, зеркальной симметрии явления можно построить установку с деталями и расположением частей, зеркально симметричными относительно прежней. Явление зеркально симметрично, если обе установки дают одинаковые результаты.

Проследим сначала, как проявляется самая простая симметрия — однородность и изотропность (эквивалентность всех направлений) *пространства*. Она означает, что любой физический прибор — часы, телевизор, телефон — должен работать одинаково в разных точках пространства, если не изменяются окружающие физические условия. То же самое относится и к повороту прибора, если отвлечься от силы тяжести, которая выделяет на поверхности Земли вертикальное направление. Эти замечательные свойства пространства использовались уже в глубокой древности, когда геометрия Евклида применялась на практике. Ведь геометрия как практическая наука имеет смысл только в том случае, если свойства геометрических фигур не меняются при их повороте и одинаковы во всех районах Земли.

Измерения показали, что геометрические теоремы, примененные к реальным физическим объектам, действительно, выполняются с колоссальной точностью для тел любого размера: в каком бы месте мы их ни проверяли и как бы ни поворачивали тела. Одно из таких измерений было сделано в 1820-х гг. известным немецким математиком К. Гауссом, который проверил, не отклоняется ли геометрия нашего мира для больших размеров от евклидовой, определяя свойства треугольника, образованного вершинами трех гор. Сейчас известно, что на масштабах Вселенной и вблизи тяжелых масс геометрия отличается от евклидовой. Но это — очень малые поправки, далеко за пределами точности измерений Гаусса.

Не только геометрические свойства, но и вообще все физические явления не зависят от перемещений или поворотов.

Итак, физические законы должны быть инвариантны (неизменны) относительно перемещений и поворотов. Это требование облегчает выводы уравнений физики и придает им более стройный вид.

Еще одна важная симметрия — однородность времени. Все физические процессы протекают одинаково, когда бы они ни начались. *Электроны* в атомах далеких звезд движутся в том же ритме, что и на Земле, — частота испускаемого ими света такая же, несмотря на то что свет был испущен миллиарды лет тому назад.

Законы природы не изменяются и от замены направления течения времени на обратное. Это означает, что взгляд назад являет такую же картину, как и взгляд вперед. Так ли это? Нам случалось видеть, как яйцо, упавшее со стола, растекается, но никогда не доводилось наблюдать, как белок и желток собираются обратно в скорлупу и «прыгают» на стол. И тем не менее молекулы в принципе могут случайно так согласовать свои движения, что невероятное свершится. В малом масштабе явления такого рода происходят с большой вероятностью: молекулы в малом объеме газа под влиянием столкновений то стекаются вместе, то растекаются так, что их плотность только в среднем является постоянной.

Глубокий анализ подобных фактов привел физиков к заключению, что «обратимость» времени существует не только в *механике* и *электродинамике*, где она прямо вытекает из уравнений, но и во многих других явлениях природы.

Симметрия, связанная с изменением направления течения времени,— приближенная симметрия. Ее нарушение наблюдается в слабых распадах некоторых элементарных частиц — нейтральных K-мезонов. И хотя эти нарушения очень малы, они играют весьма важную роль в физике *элементарных частиц*, так как приводят к абсолютному различию между частицами и античастицами: K^0-мезоны несколько чаще распадаются с испусканием антилептонов — позитронов, антимюонов, чем лептонов — электронов и мюонов. Природа нарушения инвариантности относительно обращения времени пока неизвестна, и даже неясно, какие взаимодействия нарушают эту инвариантность.

Существует, кроме того, зеркальная симметрия — волчок, закрученный направо, ведет себя так же, как закрученный налево, единственная разница в том, что фигуры движения правого волчка будут зеркальным отражением фигур левого. Существуют зеркально асимметричные молекулы, но, если они образуются в одинаковых условиях, число левых молекул равно числу правых.

Зеркальная симметрия явлений природы неточная, как и большинство других симметрий. В *слабых взаимодействиях*, ответственных за радиоактивный распад (см. *Радиоактивность*), она нарушается. Даже в явлениях, не связанных с радиоактивными превращениями, влияние слабых взаимодействий приводит к ее небольшому нарушению. Так, в атомах относительная неточность зеркальной симметрии — порядка 10^{-15}. Однако влияние этого ничтожного нарушения на переходы между очень близкими уровнями не так мало (порядка 10^{-3} — 10^{-8}). В 1978 г. Л. М. Баркову и М. С. Золотареву из Новосибирского научного городка удалось обнаружить это явление.

Важнейшая симметрия, оказавшая влияние на всю современную физику, была обнаружена

в начале XX в. Уже Г. Галилей открыл замечательное свойство механических движений: они не зависят от того, в какой системе координат их изучать, в равномерно движущейся или в неподвижной. Нидерландский физик Х. Лоренц в 1904 г. доказал, что таким свойством обладают и электродинамические явления, причем не только для малых скоростей, но и для тел, двигающихся со скоростью, близкой к скорости света. При этом выяснилось, что скорость заряженных тел не может превысить скорости света.

Французский ученый А. Пуанкаре показал, что результаты Лоренца означают инвариантность уравнений электродинамики относительно поворотов в пространстве-времени, т. е. в пространстве, в котором кроме трех обычных координат есть еще одна — временная.

Но самый важный шаг сделал А. Эйнштейн, обнаруживший, что симметрия пространства-времени всеобщая, что не только электродинамика, но все явления природы — физические, химические, биологические — не изменяются при таких поворотах. Ему удалось это сделать после глубокого и не сразу понятого современниками пересмотра привычных представлений о *пространстве* и *времени*.

Слово «поворот» надо было бы заключить в кавычки — это не обычный поворот. Поворот означает такое изменение координат, когда не изменяются расстояния между точками, например расстояние от какой-либо точки до начала координат. Математически в трехмерном пространстве это выглядит так:

$\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$, где x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 — координаты до и после поворота.

В четырехмерном пространстве, о котором мы только что говорили, по четвертой оси откладывают время t, помноженное на скорость света c, и «поворот» соответствует неизменности не расстояния до начала координат, а величины

$$\Delta = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2}.$$

Такой «поворот» обеспечивает постоянство скорости распространения света в разных системах координат. Действительно, уравнения для рапространения света, испущенного из начала координат, имеют вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2.$$

Таким образом, все симметрии, которые мы до сих пор рассматривали, объединяются в одну, всеобщую — все явления природы инвариантны относительно сдвигов, поворотов и отражений в четырехмерном пространстве-времени. Инвариантность относительно сдвигов и поворотов в обычном пространстве получается как частный случай, когда сдвиг не изменяет отсчета времени или когда вращение происходит вокруг временно́й оси.

Нужно пояснить, что́ означает инвариантность явлений природы относительно поворотов. Все физические величины можно классифицировать по тому, как они изменяются при повороте. Есть величины, определяемые только их числовым значением, без указания направления (например, объем, *масса*, плотность и др.),— они называются скалярами. Другие величины — векторы — определяются и направлением из начала координат в какую-либо точку пространства. При повороте системы координат квадрат вектора не изменяется, а его проекции на оси координат изменяются по установленному физикой закону.

Есть величины, изменяющиеся более сложно, например как произведение двух векторов. Они называются тензорными.

Кроме векторных и тензорных величин существуют другие, которые изменяются заданным образом при поворотах. Их называют спинорами. Из спиноров можно образовать квадратичную комбинацию, изменяющуюся, как вектор, или скалярную, не изменяющуюся при поворотах.

Неизменность законов или уравнений при поворотах означает, что во всех слагаемых уравнения и в левой и в правой части стоят величины, одинаково изменяющиеся при поворотах.

Так же как бессмысленно сравнивать величины разной размерности, скажем время и длину, массу и скорость, невозможно и равенство, в котором слева — скаляр, а справа — вектор.

Суть симметрии именно в разделении величин на векторы, скаляры, тензоры, спиноры...

Все рассмотренные симметрии называются пространственными. Кроме них, в физике *элементарных частиц* играют важную роль внутренние симметрии, означающие неизменность явлений при внутренних изменениях полей или частиц (см. *Поля и частицы*). Примером может служить изотопическая инвариантность *сильных взаимодействий*, которая проявляется в независимости свойств некоторых частиц от их «зарядового» состояния. Так свойства нейтрона и протона по отношению к сильным взаимодействиям с большой точностью совпадают.

Важнейшее следствие симметрии состоит в том, что каждой симметрии, как внутренней, так и пространственной, соответствует свой закон сохранения. В частности, *закон сохранения энергии* есть строгое следствие однородности *времени*, а закон сохранения импульса (количества движения) следует из однородности *пространства*. Это же относится и ко всем остальным симметриям.

СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Для описания любых процессов в природе прежде всего необходимо иметь систему отсчета. Это система координат плюс связанные с ней часы. Система координат «размечается» эталоном *длины*, неподвижным в данной координатной сетке. Часы, связанные с системой отсчета,— эталон *времени*, покоящийся в данной системе координат.

Среди систем отсчета существуют инерциальные системы. В них тела, на которые не действуют внешние силы, движутся с постоянной скоростью (и, в частности, покоятся). Если найти одну инерциальную систему отсчета, то ясно, что любая другая система, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно данной, также окажется инерциальной. И таких систем бесконечное множество. Очень просто можно доказать: если скорость системы *2* относительно системы *1* (т. е. скорость, измеренная приборами системы *1*) есть v, то скорость системы *1* относительно системы *2* (она измеряется приборами в системе *2*) есть $-v$. Этот результат справедлив и в классической *механике*, и в *теории относительности*.

Однако если серьезно задуматься над понятием инерциальной системы отсчета, то возникает много вопросов. Так, определение этой системы логически явно неудовлетворительно. Действительно, мы говорим, что в инерциальной системе тело, на которое не действуют силы, движется равномерно и прямолинейно. Но откуда известно, что на тело не действуют силы? К сожалению, нет лучшего ответа, чем следующий: силы не действуют на тело, если оно покоится или движется равномерно и прямолинейно в инерциальной системе. Очевидно, что здесь мы встретились с известной в логике ситуацией «порочного круга». Приходится, махнув рукой на логику, прибегнуть к малоубедительной интуиции. Ну разве не очевидно, что сумма сил, действующих на покоящееся тело, равна нулю!

Другой путь состоит в том, что эталон инерциальной системы отсчета выбирают, отказываясь от попыток ее логически строгого определения. Но в этом случае нет никакой уверенности в том, что более точные эксперименты не обнаружат неинерциальность данной системы.

Например, Г. Галилей считал, что система отсчета, жестко связанная с Землей, инерциальна. Позже опыт Фуко (см. с. 182) показал, что система отсчета «Земля» неинерциальна.

И. Ньютон предполагал, что есть некая данная свыше абсолютная система отсчета. В частности, ее связывали с «эфиром» — реальной субстанцией, будто бы заполняющей все пространство. После работ А. Эйнштейна выяснилось, что абсолютной системы отсчета просто не существует.

За эталон была выбрана система, связанная с «неподвижными звездами». Но затем обнаружилось, что и звезды смещаются относительно друг друга.

Когда говорят, что «наша Галактика вращается», то следует четко указать, в какой системе она вращается. Без системы отсчета слова о *движении* вообще и о вращении в частности никакого смысла не имеют.

Итак, говоря об эталоне системы отсчета, необходимо указать на реальные физические объекты, с которыми она связана. Сейчас за эталон принята инерциальная система отсчета, в которой изотропно реликтовое излучение (см. *Космология*). Однако неизвестно, не появятся ли в будущем другие эталоны инерциальной системы отсчета.

СКИН-ЭФФЕКТ

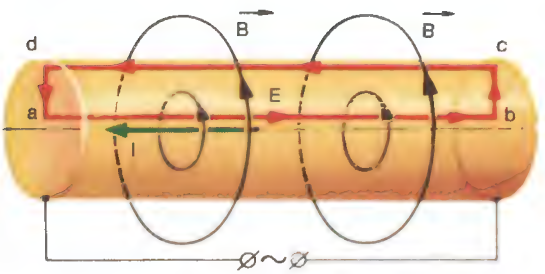
Если пропустить по проводнику переменный электрический ток высокой частоты, то окажется, что весь ток в проводнике будет протекать по тонкому поверхностному слою. Это явление и называют *скин-эффектом*. Само название происходит от английского слова, означающего «кожа».

Для того чтобы понять, почему высокочастотный ток течет только по поверхности проводника, рассмотрим достаточно длинный цилиндрический проводник (см. рис.), к концам которого приложено переменное напряжение, изменяющееся во времени с частотой ω.

Начнем со случая $\omega = 0$, т. е. постоянного напряжения, когда по проводнику течет постоянный электрический ток. Причина электрического тока — это электрическое поле, напряженность которого при постоянном напряжении одинакова в любой точке поперечного сечения. Следовательно, постоянный электрический ток равномерно распределен по всему сечению проводника. Ток в проводнике создает вокруг себя магнитное поле $\vec{B}$, силовые линии которого представляют собой концентрические окружности с центром на оси проводника; причем магнитное поле существует не только снаружи, но и внутри проводника. При постоянном токе магнитное поле никак не влияет на распределение тока по сечению.

Иначе обстоит дело в случае переменного электрического тока. Если ток в проводнике меняется во времени, то вместе с ним будет изменяться и магнитное поле. Значит, меняется и поток магнитного поля, проходящий через контур $abcd$, и в контуре возникает электродвижущая сила (ЭДС) магнитной индукции. Легко убедиться (используя «правило буравчика» и правило Ленца), что эта ЭДС всегда работает против тока на

Возникновение явления скин-эффекта.



участке *ab* и в направлении тока на участке *cd*. Поэтому мгновенное значение тока в центре проводника будет меньше, чем на его краю. Чем больше частота переменного тока, тем быстрее во времени меняется магнитное поле, тем больше ЭДС индукции и тем меньше электрический ток в центре проводника. Ток как бы вытесняется магнитным полем на поверхность проводника. При очень высоких частотах ЭДС индукции становится настолько большой, что полностью компенсирует внешнее электрическое поле внутри проводника и весь ток протекает по тонкому поверхностному слою. Это и есть *скин-эффект*. Точные расчеты позволяют определить толщину скин-слоя на поверхности, по которому течет высокочастотный ток: $\delta = \left(\frac{10^7 \cdot \rho}{2\pi\omega}\right)^{1/2}$, где ρ — удельное сопротивление проводника. Например, при частоте $\omega = 10^6$ толщина скин-слоя в медном проводнике составляет $\delta \sim 0{,}17$ мм.

Скин-эффект возникает не только для высокочастотных токов, изменяющихся во времени по закону синуса или косинуса; самое главное — чтобы ток изменялся во времени. В частности, скин-эффект возникает и в момент подключения проводника к источнику постоянного напряжения. В момент включения в контуре *abcd* возникает большая ЭДС индукции, которая полностью компенсирует внешнее электрическое поле на оси проводника. Поэтому ток сначала появляется на поверхности проводника, затем постепенно нарастает в более глубоких слоях и в последнюю очередь на оси проводника. Этот процесс заканчивается, когда ток равномерно распределится по всему сечению проводника. Такое поведение электрического тока напоминает распространение тепла при нагревании тела: оказывается, что оба этих процесса описываются одинаковыми уравнениями.

В случае быстрого изменения тока обычно вводят характерное время, за которое происходит проникновение тока (и магнитного поля) внутрь проводника, — скиновое время: $t_{ск} = \frac{4\pi^2 a^2}{10^7 \cdot \rho}$, где a — радиус проводника. Чем меньше удельное сопротивление проводника, тем дольше ток и магнитное поле будут проникать в проводник.

Что же произойдет в том случае, когда $\rho = 0$, т. е. в случае, если мы имеем дело со сверхпроводником (см. *Сверхпроводимость*)? Формально скиновое время станет бесконечно большим, магнитное поле не сможет существовать в сверхпроводнике, а ток будет протекать только по его поверхности. Так и происходит на самом деле. Это явление называют эффектом Мейснера (впервые наблюдался в 1933 г. немецким физиком В. Мейснером).

Скин-эффект играет очень важную роль в тех областях науки и техники, где используются высокочастотные или быстро меняющиеся во времени электрические и магнитные поля. Это сверхвысокочастотная электроника, радиотехника, физика *плазмы* и т. д.

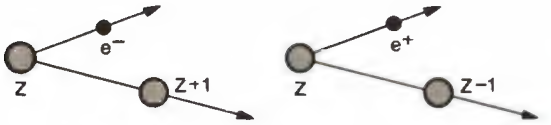
СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В 1896 г. французский ученый Анри Беккерель обнаружил радиоактивность урана. Это был первый экспериментальный сигнал о неизвестных до того силах природы — слабом взаимодействии. Теперь мы знаем, что слабое взаимодействие кроется за многими привычными явлениями, — например, оно принимает участие в некоторых термоядерных реакциях, поддерживающих излучение Солнца и других звезд.

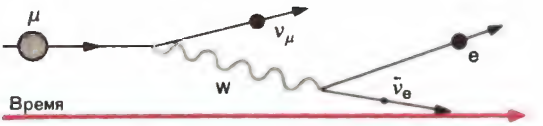
Название «слабое» досталось этому взаимодействию по недоразумению, — так, для *протона* оно в 10^{33} раз сильнее гравитационного взаимодействия (см. *Тяготение, Единство сил природы*). Это, скорее, разрушительное взаимодействие, единственная сила природы, которая не скрепляет вещество, а только разрушает его. Можно было назвать его и «беспринципным», так как в разрушении оно не считается с принципами пространственной *четности* и временно́й обратимости, которые соблюдают остальные силы.

Основные свойства слабого взаимодействия стали известны еще в 1930-х гг., главным образом благодаря работам итальянского физика Э. Ферми. Оказалось, что, в отличие от гравитационных и электрических, слабые силы имеют очень малый радиус действия. В те годы казалось, что радиуса действия вообще нет — взаимодействие происходит в одной точке пространства, и к тому же мгновенно. Это взаимодействие виртуально (на короткое время) превращает каждый *протон* ядра в *нейтрон*, позитрон — в позитрон и *нейтрино*, а каждый нейтрон — в протон, *электрон* и антинейтрино. В стабильных ядрах (см. *Ядро атомное*) эти превращения так и остаются виртуальными, подобно виртуальным рождениям электрон-

Схема бета-распада.



Распад мюона.



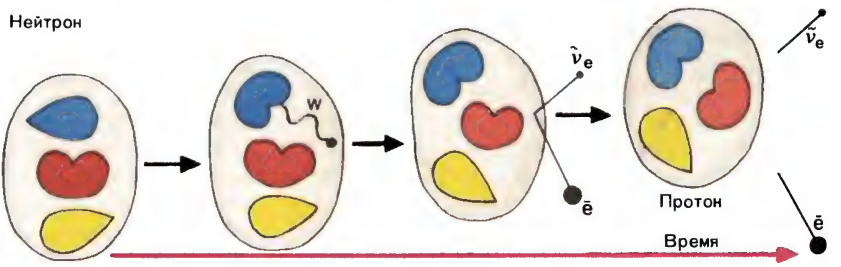
позитронных пар или протон-антипротонных пар в *вакууме*. Если разница масс ядер, отличающихся на единицу по заряду, достаточно велика, эти виртуальные превращения делаются реальными, и ядро изменяет свой заряд на 1, выбрасывая электрон и антинейтрино (электронный β-распад) или позитрон и нейтрино (позитронный β-распад). Нейтроны имеют массу, превышающую приблизительно на 1 МэВ сумму масс протона и электрона. Поэтому свободный *нейтрон* распадается на протон, электрон и антинейтрино с выделением энергии приблизительно 1 МэВ. Время жизни свободного нейтрона примерно 10 мин, хотя в связанном состоянии, например, в дейтоне, который состоит из нейтрона и протона, эти частицы живут неограниченно долго.

Аналогичное событие происходит с мюоном (см. *Лептоны*) — он распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. Перед тем как распасться, мюон живет около 10^{-6} с — гораздо меньше, чем нейтрон. Теория Ферми объясняла это разницей *масс* участвующих частиц. Чем больше энергии выделяется при распаде, тем быстрее он идет. Выделение энергии при μ-распаде около 100 МэВ, примерно в 100 раз больше, чем при распаде нейтрона. Время жизни частицы обратно пропорционально пятой степени этой энергии.

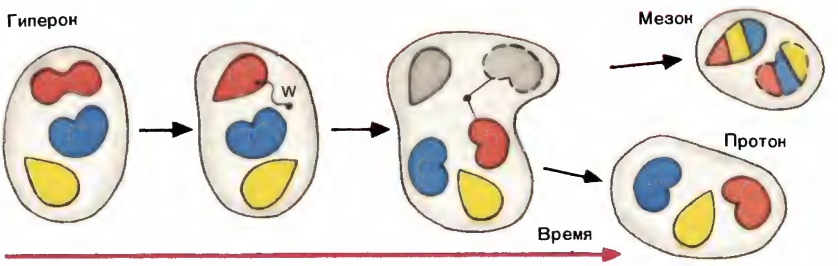
Как выяснилось в последние десятилетия, слабое взаимодействие нелокально, т. е. оно происходит не мгновенно и не в одной точке. По современной теории, слабое взаимодействие передается не мгновенно, а виртуальная пара электрон — антинейтрино рождается через 10^{-26} с после того, как мюон переходит в нейтрино, и происходит это на расстоянии 10^{-16} см. Ни одна линейка, ни один микроскоп не могут, конечно, измерить такое малое расстояние, так же как ни один секундомер не может измерить такой малый интервал времени. Как это почти всегда бывает, в современной физике мы должны довольствоваться косвенными данными. Физики строят различные гипотезы о механизме процесса и проверяют всевозможные следствия этих гипотез. Те гипотезы, которые противоречат хотя бы одному достоверному опыту, отметаются, а для проверки оставшихся ставятся новые опыты. Этот процесс в случае слабого взаимодействия продолжался около 40 лет, пока физики не пришли к убеждению, что слабое взаимодействие переносится сверхмассивными частицами — в 100 раз тяжелее протона. Эти частицы имеют спин 1 и называются векторными бозонами (открыты в 1983 г. в ЦЕРНе, Швейцария — Франция).

Есть два заряженных векторных бозона W^+, W^- и один нейтральный Z^0 (значок вверху, как обычно, указывает заряд в единицах протонного). В распадах нейтрона и мюона «работает» заряженный векторный бозон W^-. Ход распада мюона изображен на рис. (вверху, справа). Такие рисунки называют диаграммами Фейнмана, они не только иллюстрируют процесс, но и помогают его рассчитать. Это своего рода стенографическая запись формулы для вероятности реакции; здесь она используется только для иллюстрации.

Распад нейтрона. Один из трех кварков в нейтроне испускает *W*-бозон, который затем распадается на электрон (e^-) и антинейтрино ($\tilde{\nu}_e$). Кварк при этом меняет свой заряд, так что нейтрон переходит в протон.



Адронный распад гиперона. Один из трех кварков испускает *W*-бозон, который распадается на кварк и антикварк. Антикварк объединяется с одним из прежних кварков в мезон, а кварк с двумя оставшимися — в протон или нейтрон.



Мюон переходит в нейтрино, испуская W-бозон, который распадается на электрон и антинейтрино. Выделяемой энергии недостаточно для реального рождения W-бозона, поэтому он рождается виртуально, т. е. на очень короткое время. В данном случае это 10^{-26} с. За это время поле, соответствующее *W*-бозону, не успевает сформировать волну, или иначе, реальную частицу (см. *Поля и частицы*). Образуется сгусток поля размером 10^{-16} см, и через 10^{-26} с из него рождаются электрон и антинейтрино.

Для распада *нейтрона* можно было бы нарисовать такую же диаграмму, но тут она уже ввела бы нас в заблуждение. Дело в том, что размер нейтрона 10^{-13} см, что в 1000 раз больше радиуса действия слабых сил. Поэтому эти силы действуют внутри нейтрона, где находятся *кварки*. Один из трех кварков нейтрона испускает *W*-бозон, переходя при этом в другой кварк. Заряды кварков в нейтроне: $-1/3$, $-1/3$ и $+2/3$, так что один из двух кварков с отрицательным зарядом $-1/3$ переходит в кварк с положительным зарядом $+2/3$. В результате получатся кварки с зарядами $-1/3$, $2/3$, $2/3$, составляющие вместе *протон*. Продукты реакции — *электрон* и антинейтрино — беспрепятственно вылетают из протона. Но ведь кварк, испустивший W-бозон, получил отдачу и начал двигаться в противоположном направлении. Почему же он не вылетает?

Его удерживает *сильное взаимодействие*. Это взаимодействие увлечет за *кварком* его двух неразлучных спутников, в результате чего получится движущийся *протон*. По аналогичной схеме происходят слабые распады (связанные со слабым взаимодействием) остальных *адронов*. Все они сводятся к испусканию векторного бозона одним из кварков, переходу этого векторного бозона в *лептоны* (μ-, *e*-, τ- и ν-частицы) и дальнейшему разлету продуктов реакции.

Иногда, впрочем, происходят и адронные распады: векторный бозон может распасться на пару кварк — антикварк, которая перейдет в мезоны.

Итак, большое количество различных реакций сводится к взаимодействию *кварков* и *лептонов* с векторными бозонами. Это взаимодействие универсально, т. е. одинаково для кварков и лептонов. Универсальность слабого взаимодействия в отличие от универсальности гравитационного или электромагнитного взаимодействия не получила пока исчерпывающего объяснения. В современных теориях слабое взаимодействие объединяется с электромагнитным взаимодействием (см. *Единство сил природы*).

О нарушении симметрии слабым взаимодействием см. *Четность*, *Нейтрино*. В статье *Единство сил природы* рассказано о месте слабых сил в картине микромира.

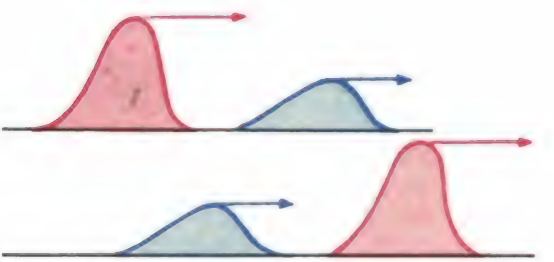
СОЛИТОН

Известно, что гигантские волны в океане — цунами, обрушиваясь на берег, приносят разрушения. В отличие от обычных волн, где горбы и впадины повторяются в пространстве, следуя друг за другом, цунами может иметь только один горб, который перемещается на огромные расстояния практически без затухания. Этот пример дает представление о уединенной волне — солитоне.

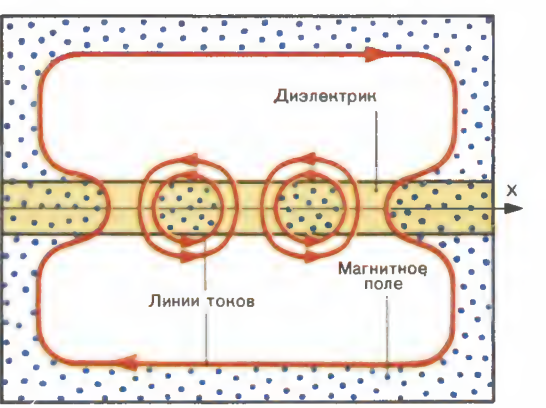
Такие волны впервые изучал в 30-х гг. прошлого столетия в Эдинбурге Джон Рассел, будущий известный кораблестроитель. В то время для перевозки грузов широко использовалась система узких каналов, по которым лошади тянули баржи. Рассел обратил внимание, что иногда при резкой остановке баржи вода, увлеченная ее движением, отрывалась от баржи и образовывался горб высотой в несколько десятков сантиметров, который двигался по каналу, не затухая, на большие расстояния.

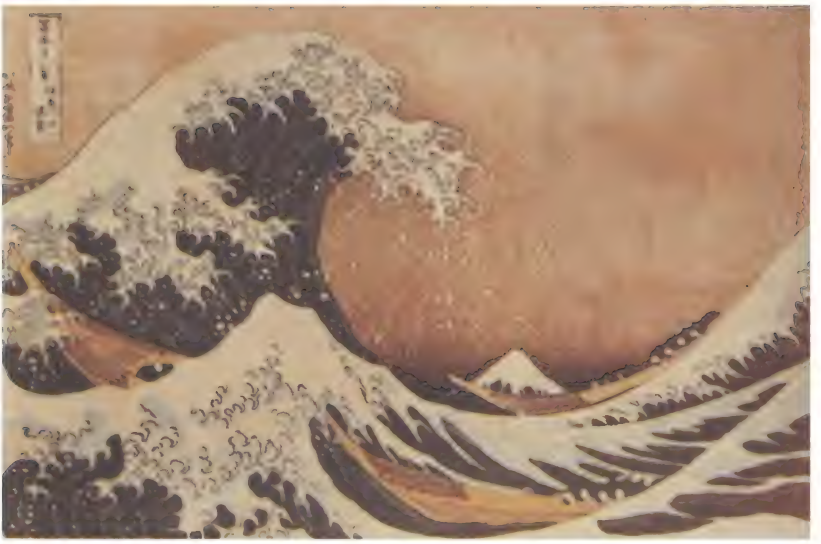
Теоретически такие волны были исследованы в 1890 г. датскими учеными Д. Кортевегом и Г. де Вризом. При определенных свойствах среды уединенные волны могут распростра-

Прохождение солитонов друг сквозь друга.



Солитоны в джозефсоновском элементе.





К. Хокусаи. Волна. (Из серии «36 видов Фудзи»).

няться в ней, не меняя своей формы. Такие условия возникают, например, на поверхности воды, когда длина волны больше, чем глубина. При этом скорость распространения волны v зависит от глубины h и приближенно определяется формулой: $v = \sqrt{gh}$. Для глубины $h = 10$ м получаем: $v = 35$ км/ч. Волна может образоваться перед кораблем при его движении с такой скоростью. Причиной уединенных волн могут быть землетрясения, когда происходят поперечные сдвиги слоев воды.

Важная особенность таких уединенных волн — их способность проходить друг через друга, не изменяя своей формы. Допустим, две волны движутся с разными скоростями в одну сторону. Тогда через некоторое время эти волны обязательно столкнутся, провзаимодействуют между собой и снова разойдутся. Форма волны после этого останется точно такой же, какой она была до столкновения.

Уравнение Кортевега — де Вриза описывает многие волновые процессы в физике *плазмы, твердых тел,* сверхпроводников, *элементарных частиц*. Соответствующие уединенные волны также называют *солитонами.*

Очень интересный пример солитонов дает *сверхпроводимость*. Если разделить две пленки сверхпроводника тонким слоем *диэлектрика,* то получается так называемый элемент Джозефсона (см. *Джозефсона эффект*). Магнитное поле, параллельное плоскости пленок, проникает в джозефсоновский элемент отдельными сгустками, окруженными кольцевыми токами — вихрями (см. рис. на с. 251, внизу). Оказывается, эти вихри обладают свойствами солитонов: они могут двигаться вдоль перехода, проходить друг через друга, не разрушаясь. Такие вихри предполагается использовать в сверхпроводящих ЭВМ.

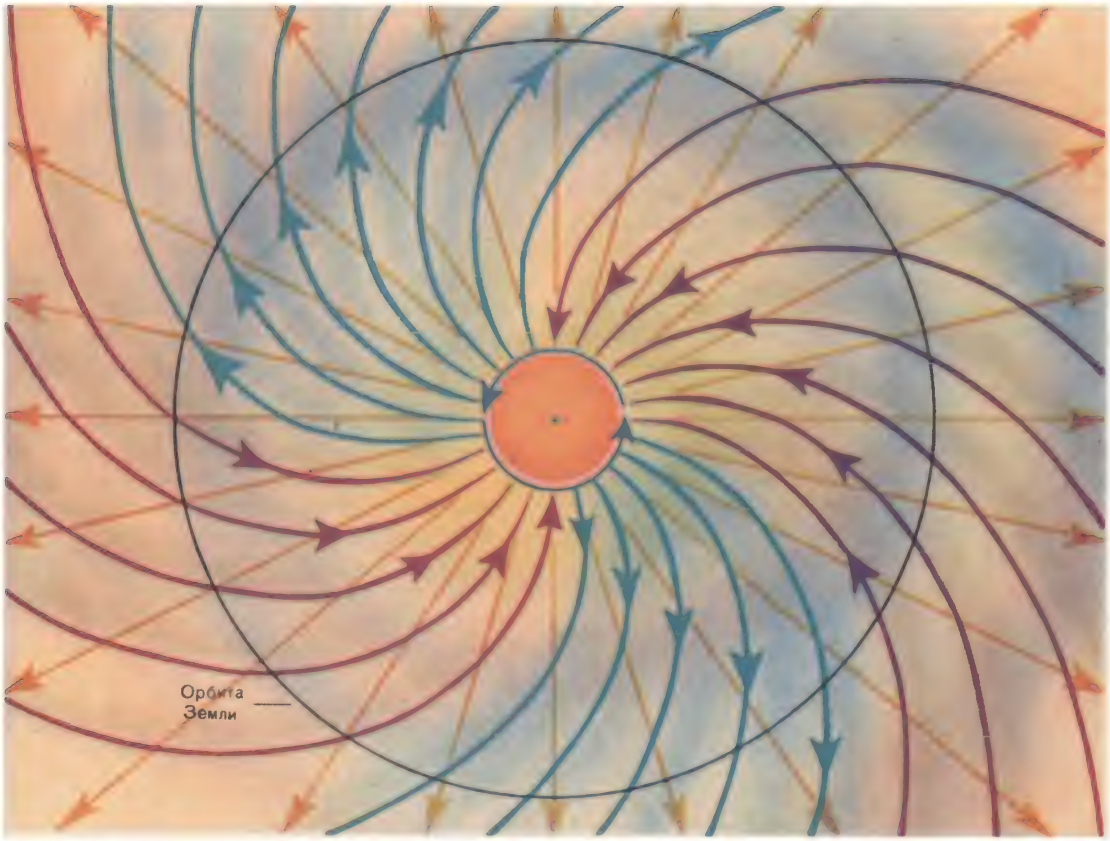
СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Атмосфера Солнца на 90% состоит из водорода. Самая удаленная от поверхности ее часть называется короной Солнца, она отчетливо видна при полных солнечных затмениях. Температура короны достигает 1,5—2 млн. К, и газ короны полностью ионизирован. При такой температуре *плазмы* тепловая скорость *протонов* порядка 100 км/с, а *электронов* — несколько тысяч километров в секунду. Для преодоления солнечного притяжения достаточна начальная скорость 618 км/с, вторая космическая скорость Солнца. Поэтому постоянно происходит утечка плазмы из солнечной короны в космос. Этот поток протонов и электронов и называется *солнечным ветром.*

Преодолев притяжение Солнца, частицы солнечного ветра летят по прямым траекториям. Скорость каждой частицы с удалением почти не меняется, но бывает она разной. Эта скорость зависит главным образом от состояния солнечной поверхности, от «погоды» на Солнце. В среднем она равна $v \simeq 470$ км/с. Расстояние до Земли солнечный ветер проходит за 3—4 суток. При этом плотность частиц в нем убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до Солнца. На расстоянии, равном радиусу земной орбиты, в 1 см^3 в среднем находится 4 протона и 4 электрона.

Солнечный ветер уменьшает массу нашей звезды — Солнца — на 10^9 кг в секунду. Хотя это число по земным масштабам и кажется большим, реально оно мало: убыль солнечной массы может быть замечена только за времена, в тысячи раз превышающие современный воз-

Прямые желтые линии — траектории частиц солнечного ветра. Зеленые и коричневые спирали — силовые линии магнитного поля, закрученные вращением Солнца.



раст Солнца, который равен приблизительно 5 млрд. лет.

Интересно и непривычно взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем. Известно, что заряженные частицы обычно движутся в магнитном поле H по окружности или по винтовым линиям. Это верно, однако, только когда магнитное поле достаточно сильное. Точнее говоря, для движения заряженных частиц по окружности нужно, чтобы плотность энергии магнитного поля $H^2/8\pi$ была больше, чем плотность кинетической энергии движущейся плазмы $\rho v^2/2$. В солнечном ветре ситуация обратная: магнитное поле слабое. Поэтому заряженные частицы движутся по прямым, а магнитное поле при этом не постоянно, оно перемещается вместе с потоком частиц, как бы уносится этим потоком на периферию Солнечной системы. Направление магнитного поля во всем межпланетном пространстве остается таким, каким оно было на поверхности Солнца в момент выхода плазмы солнечного ветра.

Магнитное поле при обходе вдоль экватора Солнца, как правило, меняет свое направление 4 раза. Солнце вращается: точки на экваторе совершают оборот за $T = 27$ суток. Поэтому межпланетное магнитное поле направлено по спиралям (см. рис.), а вся картина этого рисунка вращается вслед за вращением солнечной поверхности. Угол поворота Солнца меняется, как $\varphi = 2\pi t/T$. Расстояние от Солнца увеличивается со скоростью солнечного ветра: $r = vt$. Отсюда уравнение спиралей на рис. имеет вид: $\varphi = 2\pi r/vT$. На расстоянии земной орбиты ($r = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м) угол наклона магнитного поля к радиусу-вектору составляет, как легко проверить, 50°. В среднем такой угол и измеряется космическими кораблями, но не совсем близко от Земли. Вблизи же планет магнитное поле устроено иначе (см. *Магнитосфера*).

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

В 1927 г. В. Гейзенберг, анализируя возможность измерения координаты и импульса *электрона,* пришел к заключению, что условия, благоприятные для измерения положения, затрудняют нахождение импульса, и наоборот — эти два понятия дополнительны друг другу. Для доказательства он ставил мысленные эксперименты: чтобы определить координату электрона, нужно осветить его и посмотреть в «микроскоп». Такой способ дает неопределенность координаты Δq порядка длины волны λ использованного света $\Delta q \sim \lambda$.

Для уточнения положения электрона надо брать возможно меньшую длину волны света. Но при взаимодействии с электроном свет передает ему импульс, который растет при уменьшении длины волны. Минимальный передаваемый электрону импульс будет порядка импульса одного *фотона*, а импульс фотона p_γ связан с его длиной волны соотношением: $p_\gamma = 2\pi\hbar/\lambda$ (здесь $\hbar$ — постоянная Планка), поэтому неопределенность импульса электрона: $\Delta p > 2\pi\hbar/\lambda$. Умножая на λ и вместо λ подставляя Δq, получаем:

$$\Delta q \Delta p > 2\pi\hbar.$$

Это и есть соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Проделав множество подобных мысленных экспериментов с тем же результатом, нельзя не прийти к заключению, что здесь речь идет о принципиальном ограничении, которое природа накладывает на понятия координаты и импульса частицы. Этого ограничения не знала классическая физика, оно не вносит изменения в описание макрообъектов из-за очень малой величины постоянной Планка ($\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Помимо координаты и импульса существуют и другие величины, дополнительные друг другу. Угловое положение φ вращающегося тела и его момент количества движения M дополнительны. Их неопределенности связаны соотношением: $\Delta\varphi\Delta M > \hbar$.

Как показал Н. Бор, аналогичное соотношение существует для произведения неопределенности энергии ΔE и неопределенности момента взаимодействия Δt объекта с измерительным прибором: $\Delta E \Delta t \gtrsim \hbar$. Для пояснения этого соотношения сделаем еще один мысленный эксперимент.

Допустим, в экране, на который падает частица, имеется отверстие, достаточно широкое, чтобы пренебречь неопределенностью поперечного импульса, возникающего при прохождении частицы через экран. Пусть отвер-

ВЕРНЕР ГЕЙЗЕНБЕРГ (1901 — 1976)

Вернер Гейзенберг родился в Германии, в городе Вюрцбурге, где его отец преподавал в гимназии греческий язык. Когда Гейзенберга-старшего пригласили преподавателем в Мюнхенский университет, семья переехала в Мюнхен. Там Вернер поступил в гимназию. Уже в гимназические годы у будущего ученого обнаружилась редкая и многосторонняя одаренность. Подобно его отцу, он обладал незаурядными лингвистическими способностями, зачитывался трактатами античных философов, превосходно играл на фортепиано и органе, увлекался спортом. Но больше всего поражали и учителей, и одноклассников его математические способности.

После окончания гимназии В. Гейзенберг учился в Мюнхенском университете, там одним из его преподавателей был известный ученый А. Зоммерфельд.

Затем Гейзенберг проходил стажировку у не менее известного ученого М. Борна, в Гёттингене. Именно здесь в 1925 г. он выполнил одну из своих важнейших научных работ об интенсивностях спектральных линий. Это был первый шаг на пути создания новой физической теории — *квантовой механики*. Теоретическая схема Гейзенберга — так называемая матричная механика — позволяла с помощью совершенно новых для физики математических приемов вычислять величины, непосредственно измеряемые в экспериментах.

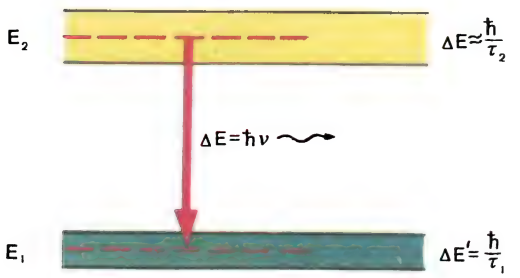
В. Гейзенберг был также учеником выдающегося датского физика Н. Бора. Результатом научных дискуссий между ними по вопросам толкования квантовой механики стало открытие Гейзенбергом в 1927 г. знаменитого *соотношения неопределенностей*. Это соотношение означает, что сопряженные переменные (такие, например, как координаты и импульс частицы) не могут быть одновременно измерены с произвольной точностью — утверждение, кажущееся совершенно необычным с точки зрения классической физики.

За работы по квантовой механике В. Гейзенбергу в 1933 г. была присуждена Нобелевская премия.

В дальнейшем Гейзенбергом был получен еще целый ряд важных результатов в области *теоретической физики*, имевших большое значение для развития *квантовой механики атома* и *атомного ядра*, квантовой *электродинамики*, теории *элементарных частиц* и физики *твердого тела*.

В последние годы жизни Гейзенберг сосредоточил свои усилия на создании единой теории поля с целью объединения всех типов фундаментальных взаимодействий и характеристики всех *элементарных частиц*. Эта грандиозная задача не решена и по сей день. Однако в последние десятилетия в этом направлении достигнуты значительные успехи. И идеи Гейзенберга сыграли здесь свою важную роль.

Схема перехода атома с энергией E_2 в состояние с энергией E_1 со средним временем жизни уровня 2, равным τ_2.



стие закрывается заслонкой на определенное время Δt. Поскольку момент взаимодействия частицы с краями отверстия имеет неопределенность Δt, то неопределенность координаты частицы в продольном направлении есть $\Delta q = v\Delta t$, где v — скорость частицы. Предполагается, что при прохождении отверстия скорость мало изменилась. Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга, неопределенность импульса частицы $\Delta p \gtrsim \hbar/\Delta q = \hbar/v\Delta t$. Но неопределенность импульса создает неопределенность энергии $\Delta E = v\Delta p = \hbar/\Delta t$, а это и есть соотношение неопределенностей Бора.

До сих пор говорилось о неопределенностях, которые возникают в акте измерения. В этих случаях уравнение Шрёдингера неприменимо для описания частицы хотя бы потому, что она не изолирована, а взаимодействует с другой системой, играющей роль измерительного прибора.

Есть соотношение неопределенностей, имеющее другой физический смысл. Пусть частица находится в определенном состоянии, описываемом волновой функцией, которая удовлетворяет уравнению Шрёдингера. В этом состоянии интервалы возможных значений дополнительных величин (например, средние квадратичные отклонения импульса и координаты частицы от их средних значений) будут удовлетворять соотношению неопределенностей.

Так, в основном состоянии атома водорода волновая функция дает интервал возможных значений координаты электрона, который связан с интервалом возможных значений импульса соотношением: $\Delta p \Delta q \gtrsim \hbar$. Отсюда можно оценить радиус атома a, характеризующий интервал возможных значений координаты. В основном состоянии потенциальная энергия электрона e^2/a должна быть примерно равна кинетической энергии $p^2/2m$ (где p по порядку величины равно возможному значению импульса $p \sim \hbar/a$). Приравнивая эти две энергии, получаем оценку для радиуса атома $a = \hbar^2/me^2$ и для энергии ионизации $I = me^4/\hbar^2$.

Атом в возбужденном состоянии имеет неопределенную энергию. Эта неопределенность объясняется переходом на нижние уровни, сопровождающимся испусканием кванта. Неопределенность энергии связана соотношением Бора со временем жизни атома τ по отношению к испусканию света: $\Delta E\tau \gtrsim \hbar$.

Соотношение неопределенностей — частный случай и конкретное выражение общего принципа дополнительности, сформулированного Н. Бором в 1927 г. Именно этот принцип позволяет примирить, казалось бы, непримиримое: ведь *электрон* проявляет себя в различных экспериментах то как частица, то как волна. *Квантовая механика* осуществляет синтез этих понятий и дает возможность предсказать исход любого опыта, в котором проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства частиц.

Принцип дополнительности Бор применял во многих областях. Так, например, физическая картина явления и его математическое описание дополнительны. Создание физической картины требует пренебрежения деталями и уводит от математической точности, а попытка точного математического описания явления затрудняет его ясное понимание.

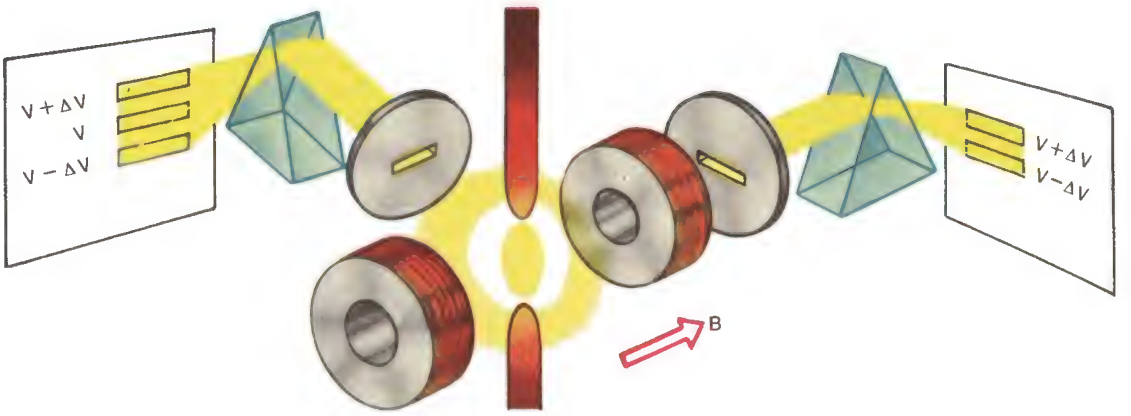
Квантовая механика не дает однозначного ответа на некоторые вопросы, а лишь предсказывает вероятность того или иного результата. Классическая физика не знала неопределенности. Если задать координаты и скорости механической системы, то можно однозначно предсказать все ее поведение. В то же время, как следует из соотношения неопределенностей, задать координаты и скорости всех частиц невозможно, есть возможность лишь задать в начальный момент волновую функцию системы. Квантовая механика позволяет найти ее в любой следующий момент.

Невозможность однозначно предсказать исход опыта была настолько непривычной, что вызвала множество возражений. Достаточно ли полно квантовомеханическое описание, или нужно создать более точную теорию? Многолетний спор Бора с Эйнштейном по этому поводу привел к углублению и уточнению понятий квантовой физики.

Особенность квантовой механики состоит в том, что свойства микроскопических объектов нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения. В зависимости от него электрон проявляет себя либо как волна, либо как частица, либо как нечто промежуточное. Конечно, существуют свойства, не зависящие от способа наблюдения: *масса*, заряд, *спин* частицы... Но всякий раз, когда мы хотим одновременно измерить дополнительные друг другу величины — такие, как координата и скорость, результат будет зависеть от способа наблюдения.

Принципиальная неопределенность некоторых величин есть следствие применения классических понятий к описанию неклассических объектов. Квантовая природа микрообъектов дополнительна их классическому описанию.

Линии-спутники, появляющиеся при наложении магнитного поля на излучающие атомы.



СПЕКТРОСКОПИЯ

Немецкий ученый Р. Бунзен заметил, что в пламени изобретенной им очень жаркой горелки вещества, превращаясь в пар, окрашивают пламя в разные цвета. Так, медь давала зеленое пламя, поваренная соль — желтое, а стронций — малиново-красное. Казалось, стóит только поместить в горелку вещество — и по цвету пламени удастся определить его состав. Однако вскоре Бунзен установил, что вещества разного состава в некоторых случаях окрашивали пламя одинаково. Тогда его соотечественник физик Г. Кирхгоф предложил пропускать свет пламени через стеклянную призму, разделяющую цветные лучи на монохроматические. Для глаза пламя, окрашенное литием или стронцием, всегда одного — малиново-красного цвета, а после прохождения через призму свет литиевого пламени разлагается в две линии — яркую малиновую и рядом с ней — слабую оранжевую, а стронций дает голубую, две красные и оранжевую линии.

Оказалось, светящиеся пары любого химического элемента излучают только одному ему свойственный с п е к т р — набор монохроматических излучений, каждому из которых в спектре принадлежит своя линия. Спектры всех элементов собраны в специальных таблицах. В них указаны длины *волн*, последовательность и интенсивность спектральных линий. Так по спектрам ученые научились расшифровывать состав излучающего вещества. Появился новый раздел физики — *спектроскопия*, изучающая спектры электромагнитного излучения. Это произошло в 1859 г., когда Бунзен и Кирхгоф проанализировали первые линейчатые спектры химических элементов.

В 1868 г. французский астроном Ж. Жансен и английский астрофизик Дж. Локьер, анализируя солнечный свет, обнаружили (независимо друг от друга) в солнечных лучах спектр неизвестного элемента. Новый элемент открыли на расстоянии 150 млн. км от Земли! Позднее в честь Солнца его назвали гелием. После этого открытия началось изучение спектров космических тел, состава Солнца и звезд. Оказалось, что звездное вещество состоит из тех же атомов, что и земное. По спектрам можно измерить скорость движения тел. Благодаря *эффекту Доплера* у движущегося источника спектр сдвигается в сторону длинных или коротких длин волн в зависимости от того, удаляется или приближается источник света к наблюдателю. По такому сдвигу астрономы измерили скорость галактик.

Анализ спектров дает возможность обнаружить и магнитные поля. При воздействии магнитного поля на излучающие атомы появляются линии-спутники (см. рис).

Спектроскопия сыграла огромную роль в развитии *квантовой механики*. Первая квантовая модель атома была создана Н. Бором на основе анализа формулы швейцарского ученого И. Бальмера, описывающей спектр водорода.

По спектрам ученые определяют энергетические уровни *атомов* и *молекул* с помощью излучений в широком диапазоне длин волн. Спектры ионизованных атомов излучаются в диапазоне длин волн 0,2 — 200 нм, нейтральных атомов и молекул — 200 — 700 нм, спектры органических молекул лежат в ИК-диапазоне (в инфракрасной области спектра), а прочно связанные внутренние электроны атомов исследуют с помощью γ-квантов с энергией до 100 КэВ (см. *Гамма-излучение*). Излучения атомов при малых энергиях переходов между уровнями ученые успешно исследуют с помощью радиотехнических средств.

С рождением *лазеров* появился новый раздел *спектроскопии* — л а з е р н а я. Лазеры с перестраиваемой частотой позволяют установить частоту излучения так, что будет возбужден вполне определенный уровень атома или

молекулы. При этом не возбуждаются другие квантовые состояния, как это бывает при возбуждении светом обычных источников. Лазеры с перестраиваемой частотой дают возможность достигнуть предельной чувствительности спектрального анализа — обнаруживать отдельные атомы элемента с концентрацией, скажем, в 100 атомов на 1 $см^3$ объема газа.

СПИН

Элементарные частицы — это маленькие вращающиеся волчки. Они характеризуются моментом количества движения, или, кратко, угловым моментом. Согласно *квантовой механике*, угловой момент системы может принимать не любые значения: его скачки равняются постоянной Планка $\hbar$ ($1{,}054 \cdot 10^{-34}$ Дж · с). Поэтому угловой момент элементарных частиц естественно измерять в единицах $\hbar$. Момент, измеренный в таких единицах, называется *спином*. Он может принимать целые или полуцелые значения. Так, спин *электрона* в атоме водорода в основном состоянии равен 1/2, а в возбужденных состояниях принимает значения 1/2, 3/2, 5/2,... . Спин атома гелия в основном состоянии — 0, а в возбужденных — 0, 1, 2, 3.... Спин *электрона*, *нейтрона*, *протона* равен 1/2. Спин ядер с четным числом нейтронов и протонов равен 0, а в возбужденных состояниях может принимать целочисленные значения.

Дискретность возможных значений углового момента совершенно незаметна в обычной жизни, поскольку $\hbar$ очень мало. Даже маленький по нашим обыденным представлениям угловой момент 1 град · $см^2$/с равен $10^{27}\hbar$.

Согласно квантовой механике, проекция момента на какую-либо ось тоже имеет дискретные значения, отличающиеся на $\hbar$. Так как проекция вектора на ось, скажем z, есть его длина, помноженная на косинус угла между вектором и осью, то, значит, и угол, под которым наклоняется волчок, может принимать только дискретные значения. Разумеется, и эта дискретность тоже находится далеко за пределами измерительных возможностей обычной *механики*.

Иное дело — малые объекты, *атомы* и *молекулы*, *электроны* и нуклоны *ядра*: для них дискретность возможных значений вектора момента и его проекций легко увидеть. Так, проекция спина 1/2 может принимать только два значения: 1/2 и —1/2, а для спина 1 возможные проекции +1, 0, —1, и дискретность очень заметна. Число проекций возрастает с увеличением спина. Для спина I число проекций равно $2I + 1$.

Дискретность значений проекции момента была обнаружена в 1922 г., еще до создания *квантовой механики*, в замечательном опыте, осуществленном в Германии физиками О. Штерном и В. Герлахом. Они пропускали пучок молекул через неоднородное магнитное поле. Сила, с которой поле действовало на частицы, была пропорциональна проекции магнитного момента молекулы на направление поля, а проекция магнитного момента пропорциональна проекции спина. После прохождения через магнитное поле пучок разбился на три пучка: неотклоненный пучок соответствовал проекции спина 0, а два других, отклоненных по разные стороны от него, соответствовали проекциям +1 и —1. По числу пучков можно было сразу заключить, что спин молекул, которые они изучали, равен единице.

Спин *элементарной частицы* — важная характеристика классификации частиц. Спин частиц оказывает существенное влияние на поведение системы, состоящей из одинаковых частиц. Так, волновая функция двух одинаковых частиц не изменяется при перестановке координат в случае частиц с целым спином, и изменяет свой знак для частиц с полуцелым спином.

СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ

Большинство симметрий возникает при некоторой идеализации задачи (см. *Симметрия законов природы*). Учет влияния более сложных взаимодействий приводит к нарушению симметрии. Например, независимость энергии атома водорода от орбитального момента делается неточной, и симметрия слегка нарушается, если учесть релятивистские поправки к движению *электрона* (см. *Релятивистская механика*). Даже законы сохранения, связанные с пространственной симметрией, очень слабо, но все же нарушаются неоднородностью Вселенной во *времени* и *пространстве*.

Существует гораздо более важное нарушение симметрии — спонтанное (самопроизвольное). Оно заключается в том, что в системе, описываемой симметричными законами и удовлетворяющей симметричным начальным условиям, возникают несимметричные конечные состояния. Рассмотрим, например, следующий простой эксперимент. Пусть металлический стержень сжимается в гидравлическом прессе, так что вся эта система и все действующие в ней силы обладают цилиндрической симметрией. Если сила давления на стержень превышает его предел прочности на изгиб, то система становится неустойчивой и стержень изгибается (а затем и ломается) в каком-то произвольном направлении по азимуту. Итак, цилиндрическая симметричная систе-

ма спонтанно перешла в состояние, не обладающее исходной симметрией.

Приведем другой пример. Пусть шарик падает по оси стакана на дно, обладающее формой выпуклой сферической полусферы. Опять система цилиндрически симметричная, и все действующие в ней силы удовлетворяют условию цилиндрической симметрии. Однако положение шарика на вершине сферы неустойчиво, и он скатывается вниз. Конечное состояние снова оказывается уже не обладающим исходной цилиндрической симметрией.

Рассмотрим далее жидкость, в которой атомы расположены хаотично и взаимодействия между ними удовлетворяют условию симметрии относительно поворотов и трансляционной симметрии — относительно сдвигов. Если эта жидкость кристаллизуется, то возникает конечное состояние, в котором обе эти симметрии оказываются нарушенными.

Все эти явления спонтанного нарушения симметрии характеризуются рядом общих черт. Они происходят тогда, когда симметричные состояния оказываются неустойчивыми и под действием малых возмущений переходят в энергетически более выгодные несимметричные состояния. Однако начальная симметрия накладывает все же свой отпечаток и на эти конечные состояния. Будем повторять опыты с шариком, падающим на выпуклое дно стакана много раз. Тогда шарик с равной вероятностью попадает во все возможные положения по азимуту. И эти состояния переходят одно в другое при операциях поворота относительно вертикальной оси — оси симметрии исходной системы. То же будет и в других рассмотренных выше примерах. Таким образом, если возникает некоторое конечное состояние, в котором начальная симметрия нарушена определенным образом, то с равной вероятностью могут возникать и все другие состояния, получающиеся из этого первого состояния с помощью преобразований исходной симметрии.

Спонтанное нарушение симметрии может сильно замаскировать симметрию физических законов. Представим себе маленького «человечка», живущего внутри большого кристалла. В его «мире» пространство имеет ячеистую структуру, и в нем есть выделенные направления. Поэтому нашему «человечку» нелегко будет докопаться до исходной пространственной изотропии и трансляционной симметрии, характерной для взаимодействия между молекулами вещества.

Спонтанные нарушения симметрии встречаются в природе на каждом шагу. Капля воды, лежащая на столе, — пример нарушения симметрии: ведь взаимодействие молекул между собой и с молекулами стола допускает более симметричное решение — вода размазана тонким слоем по столу. Но это решение для малых капель энергетически невыгодно.

Атомное ядро представляет собой каплю нуклонной жидкости — это тоже пример нарушения трансляционной симметрии. Существуют не только сферические, но и «деформированные» ядра, имеющие форму эллипсоида, — это нарушение не только трансляционной, но и вращательной симметрии.

Спонтанное нарушение симметрии — весьма распространенное явление в макроскопической физике. Однако понимание этих фактов пришло в физику высоких энергий с большим запозданием. Не все физики, занимавшиеся теорией *элементарных частиц*, сразу приняли возможность асимметричных решений в симметричных системах.

Как правило, в физике элементарных частиц большинство симметрий — приближенные: они справедливы для одних взаимодействий и нарушаются другими взаимодействиями, более слабыми. Примеры таких нарушенных симметрий — симметрия явлений природы относительно зеркальных отражений, симметрия относительно перехода от частиц к античастицам, симметрия относительно обращения времени, изотопическая инвариантность (т. е. симметрия сильных взаимодействий *протонов* и *нейтронов*) и т. д. Все они оказываются приближенными и слегка нарушаются. И добиться понимания природы возникновения таких нарушений оказалось довольно сложным делом. Здесь на помощь пришло представление о спонтанном нарушении симметрии. Плодотворная тенденция теории элементарных частиц состоит в предположении, что на сверхмалых расстояниях или при сверхбольших импульсах «царствует» максимальная симметрия. Но при переходе к меньшим энергиям возникает спонтанное нарушение, которое может сильно замаскировать эту симметрию. Так, в теории электрослабого взаимодействия, объединяющего *электродинамику* и *слабые взаимодействия*, при сверхбольших энергиях (порядка 10^{15} ГэВ) существуют четыре равноценных безмассовых поля, которые в силу спонтанного нарушения при меньших энергиях превращаются в три массивных промежуточных бозона и один безмассовый *фотон*: симметричная система так перестроилась, что появились три частицы с массой порядка 100 ГэВ и одна частица с массой, равной нулю. Возникновение массивных барионов в системе безмассовых глюонов и кварков (см. *Сильные взаимодействия*) — это другой пример спонтанного нарушения симметрии.

Можно думать, что и многие другие симметрии — зеркальная симметрия, симметрия между частицами и античастицами и т. д.— неточны в силу спонтанного нарушения. Другими словами, исходные законы физики максимально симметричны, а наблюдаемые асимметрии связаны с тем, что мы существуем в мире со спонтанно нарушенными симметриями. Та-

ким образом, мы в какой-то степени напоминаем «человечков», живущих в кристалле и удивляющихся несимметричному характеру своего «мира».

Приведенные примеры показывают, какие принципиальные свойства элементарных частиц определяются явлением спонтанного нарушения симметрии.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Статистическая физика изучает свойства сложных систем — *газов, жидкостей, твердых тел* и их связь со свойствами отдельных частиц — *атомов* и *молекул*, из которых эти системы состоят.

Для описания движения планет в Солнечной системе, движения космического корабля, работы простых механизмов используют уравнения *механики*, которые позволяют определить положения и скорости всех частей системы, траектории планет, т. е. все, что нужно для полного описания изучаемой системы. Но уравнения механики становятся бессильными, когда число частиц в системе очень велико, например когда надо описать поведение газа, состоящего из большого числа молекул, или исследовать законы электрического тока в кристалле, которые связаны с движением большого числа *электронов* и их столкновениями с атомами кристаллической решетки.

С другой стороны, ясно, что для таких систем не нужно слишком детального описания. Нельзя измерить энергию и импульс всех молекул газа, нельзя проследить за поведением отдельного электрона в кристалле. В газе мы измеряем *давление*, которое есть результат ударов большого числа молекул; сопротивление кристалла есть следствие большого числа столкновений *электронов* с атомами. Во всех физических системах, состоящих из большого числа частиц, изучаются величины, усредненные по многим частицам. Даже тогда, когда наблюдается движение одной частицы в газе, например когда наблюдают ее *броуновское движение*, то оно возникает в результате ударов многих молекул газа. Таким образом, для того чтобы изучить связь свойств больших макроскопических систем с их атомным строением, надо уметь описывать средние статистические свойства, забывая в значительной степени об уравнениях классической и *квантовой механики*, которые описывают движение отдельных частиц.

Впервые проблемы, связанные со *статистической физикой*, возникли в середине XIX в., когда появилась *кинетическая теория* газов. Английский физик Дж. Максвелл решил задачу о том, как распределены молекулы газа по скоростям, и вывел функцию распределения, которая определяет вероятность для молекулы иметь определенные значения величины и направления скорости.

Зная функцию распределения, Максвелл вычислил коэффициенты *вязкости* и *диффузии* газа. Эти величины можно определить, если известен закон взаимодействия между молекулами.

Австрийский физик Л. Больцман вывел так называемое кинетическое уравнение для функции распределения, которое в принципе позволяет вычислить ее для произвольного газа.

Статистическая физика приняла завершенный вид после работ американского физика Дж. У. Гиббса, который дал общий метод вычисления усредненных макроскопических величин для произвольной системы.

Метод Гиббса оказался настолько общим, что не потерял своего значения и после того, как появилась квантовая механика. Он позволил построить квантовую статистику, отличающуюся от классической статистики, открытой Максвеллом.

Формулы классической статистики справедливы лишь при достаточно высоких температурах. Для идеальных газов квантовые эффекты сказываются только при температурах вблизи абсолютного нуля. С другой стороны, *электроны* в *металле,* которые во многих отношениях ведут себя, как газ, не могут быть описаны классической статистикой и при температурах, при которых плавится металл. Главную роль здесь играет *принцип Паули,* который запрещает электронам терять всю свою энергию даже при температуре абсолютного нуля, так как два электрона не могут находиться в одном и том же состоянии. Статистика, учитывающая принцип Паули, называется статистикой Ферми — Дирака; она применяется для описания электронов в металле, нуклонов в ядрах. (Этой статистике подчиняются системы, состоящие из частиц, *спин* которых равен $\hbar/2$ и вообще полуцелому числу.)

Другому типу статистики подчиняется электромагнитное излучение, которое можно рассматривать как релятивистский газ, состоящий из фотонов. Такая система описывается статистикой Бозе — Эйнштейна. Эта статистика привела к выводу о существовании вынужденного излучения, эффекта, на котором основан принцип работы *лазеров*. Статистикой Бозе — Эйнштейна описываются свойства жидкого гелия, состоящего из *изотопов* обычного гелия с массовым числом 4. У ядер этих изотопов спин равен 0.

Жидкий гелий-3, т. е. изотоп с массовым числом 3 и спином $\hbar/2$, описывается статистикой Ферми — Дирака, и его свойства сильно отличаются от свойств обычного жидкого гелия.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Долгое время казалось, что самое интересное в физике — это исследование микромира и макрокосмоса. Именно там пытались найти ответы на наиболее важные, фундаментальные вопросы, объясняющие устройство окружающего мира. И вот сейчас образовался третий фронт исследований — изучение твердых тел.

Почему же так важно исследовать твердые тела?

Огромную роль, конечно, играет здесь практическая деятельность человека. Твердые тела — это *металлы* и *диэлектрики,* без которых немыслима электротехника, это — *полупроводники,* лежащие в основе современной электроники, магниты, сверхпроводники, конструкционные материалы. Словом, можно утверждать, что научно-технический прогресс в значительной мере основан на использовании твердых тел.

Но не только практическая сторона дела важна при их изучении. Сама внутренняя логика развития науки — физики твердого тела — привела к пониманию важного значения коллективных свойств больших систем.

Твердое тело состоит из мириад частиц, которые взаимодействуют между собой. Это обусловливает появление определенного порядка в системе (рис. 1) и особых свойств всего коллектива микрочастиц. Так, коллективные свойства *электронов* определяют электропроводность твердых тел, а способность тела поглощать тепло — *теплоемкость* — зависит от характера коллективных колебаний *атомов* при тепловом движении. Коллективные свойства объясняют все основные закономерности поведения твердых тел.

Структура твердых тел многообразна. Тем не менее их можно разделить на два больших класса: кристаллы и аморфные тела.

Строго говоря, аморфное состояние не является равновесным и с течением времени аморфное тело должно закристаллизоваться. Однако в обычных условиях это время может быть столь велико, что неравновесность не проявляется и аморфное тело практически устойчиво.

Рис. 1. Микрофотография кончика острой вольфрамовой иглы, на которой видно расположение атомов вольфрама.

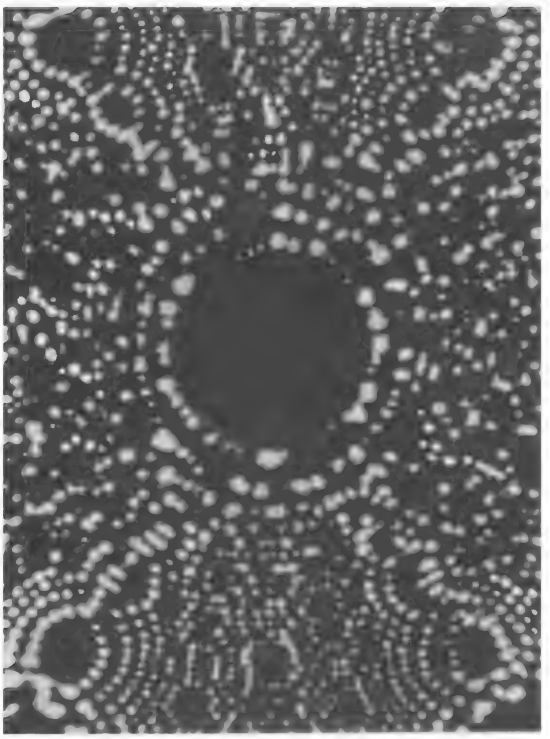
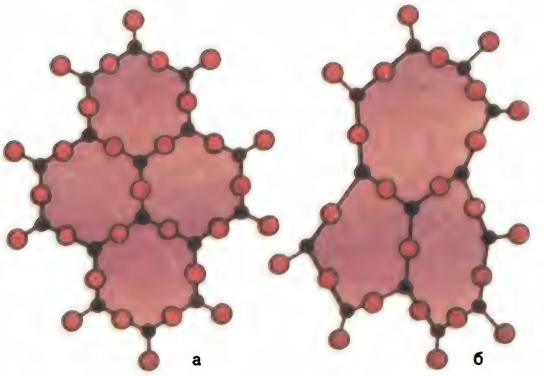


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография кристаллической пленки золота.

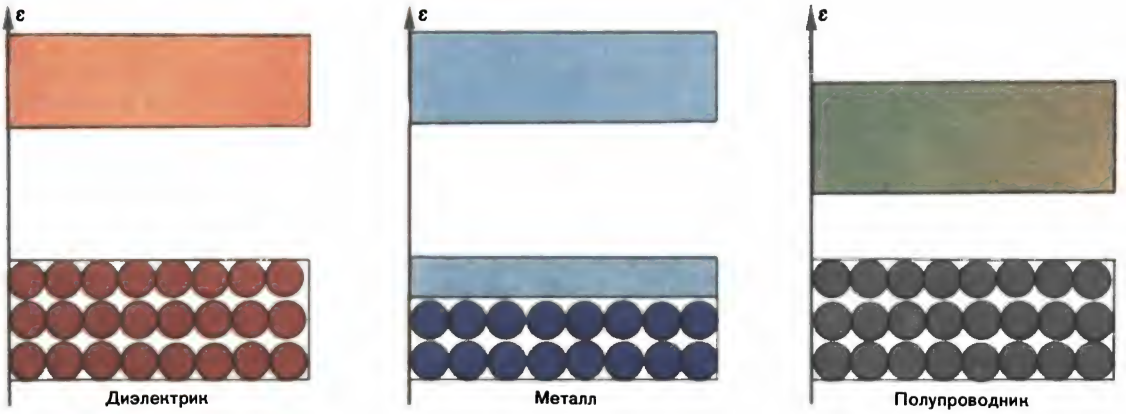
Рис. 3. Схематическая структура кристалла кварца (*а*) и аморфного стекла (*б*).



поверхность специальным травящим составом. В местах выхода дислокаций на поверхность кристалл растворяется сильнее, и образуются так называемые ямки травления.

В аморфных веществах порядок нарушен не локально, а целиком (см. *Аморфное состояние*). В них нет дальнего порядка. В то же время какое-то подобие порядка в аморфных веществах сохраняется. На рис. 3 показано различие между кристаллом

Рис. 4. Энергетические зоны в твердых телах.



В кристаллах *атомы* (или ионы) расположены в пространстве в узлах кристаллической решетки (см. *Кристаллофизика*). Строгая периодичность в расположении атомов приводит к сохранению порядка на больших расстояниях (в таком случае говорят, что имеется дальний порядок).

На рис. 2 приведена фотография кристаллической пленки золота, полученная с помощью электронного микроскопа. Пленка состоит из областей с разными ориентациями кристаллической решетки. В каждой области ясно видна строгая периодическая структура с характерным расстоянием между атомами. Вы как бы смотрите на одну и ту же кристаллическую решетку под разными углами. Период этой решетки составляет всего ангстремы. Но известны вещества, в которых период дальнего порядка очень велик. В клыках мамонта и иглах дикобраза найдены белковые структуры, повторяющиеся через 0,1 мкм. Это очень большая величина для атомного мира.

Все реальные кристаллы имеют несовершенные структуры. В каком-то месте решетки может образоваться пустое место (вакансия) или внедриться чужеродный атом (примесь), или *дислокации* нарушат порядок в кристалле. Такие дефекты можно сделать видимыми, если обработать кварца (черные точки — атомы кремния, красные — кислорода) и стеклом. Как видно, вблизи каждого атома и в стекле все же есть определенная структура. Поэтому говорят, что в аморфных веществах имеется ближний порядок.

Интересные опыты провел в 1959 г. английский физик Д. Бернал, изучая геометрическую структуру жидкостей и аморфных тел. Он взял много маленьких пластилиновых шариков одинакового размера, обвалял их в меловой пудре и спрессовал в большой ком. В результате шарики деформировались в многогранники. Оказалось, что при этом преимущественно образовывались пятиугольные грани, а многогранники в среднем имели 13,3 грани. Так что какой-то порядок в аморфных веществах определенно есть.

Тепловое движение вызывает колебания атомов (или ионов), из которых состоит твердое тело. Амплитуда колебаний обычно мала по сравнению с межатомными расстояниями, и атомы не покидают своих мест. Поскольку атомы в твердом теле связаны между собой, их колебания происходят согласованно, так что по телу с определенной скоростью распространяется *волна*. Для описания колебаний в твердых телах при *низких температурах* часто используют представление о *квазичастицах — фононах*.

Рис. 5. Возбуждение электронов в полупроводнике.

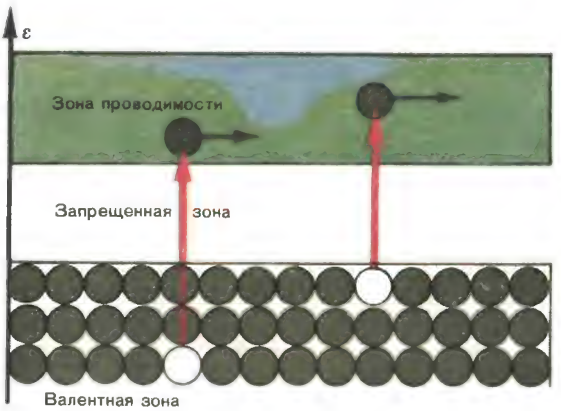
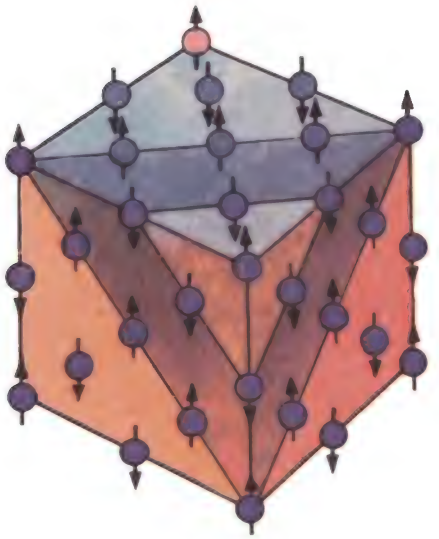


Рис. 6. Магнитное упорядочение в решетке оксида марганца.



По своим электронным свойствам твердые тела разделяются на *металлы, диэлектрики* и *полупроводники*. Кроме того, при низких температурах возможно особое сверхпроводящее состояние, в котором сопротивление электрическому току равно нулю (см. *Сверхпроводимость*).

Движение микрочастиц подчиняется законам *квантовой механики*. У связанных *электронов*, например в *атоме*, энергия может принимать только определенные, квантованные значения. В твердом теле эти уровни энергии объединяются в зоны, разделенные запрещенными областями энергии (см. рис. 4). В силу *принципа Паули* электроны не скапливаются на нижнем уровне, а занимают уровни с разными энергиями. При этом может оказаться, что в результате все уровни энергии в зоне будут заполнены. Такое твердое тело является *диэлектриком*. Изменить энергию электрона в этом случае можно только сразу на большую конечную величину (ширину запрещенной области, или, как говорят, энергетической щели). Поэтому электроны в диэлектрике не могут ускоряться в электрическом поле, и проводимость при нулевой температуре (когда нет тепловых возбуждений) равна нулю (сопротивление бесконечно).

В *металле*, напротив, верхний заполненный уровень энергии лежит внутри зоны, энергия электронов может меняться почти непрерывно, и электрическое поле создает ток. Упорядоченное движение электронов вдоль поля накладывается на интенсивное хаотическое движение. Максимальния энергия электронов определяется их концентрацией. В типичных металлах эта величина порядка электронвольт. Соответствующая такой энергии температура $\sim 10^4$ К! Так что даже при абсолютном нуле часть электронов в металле энергично движется и имеет огромную эффективную температуру.

Полупроводник — это тот же диэлектрик, но с малой величиной энергетической щели. Тепловое движение может «забрасывать» электроны в свободную зону (она называется зоной проводимости в отличие от заполненной валентной зоны), где они уже ускоряются электрическим полем (рис. 5). Поэтому полупроводники обычно имеют небольшую проводимость, резко зависящую от температуры. На проводимость полупроводников можно также влиять, вводя специальные примеси (см. *Полупроводники*).

Полупроводниковые кристаллы позволяют создавать сложные электронные полупроводниковые приборы, в том числе так называемые интегральные схемы. Сейчас достигнута такая степень интеграции, что миллионы отдельных элементов умещаются на площади в 1 см^2! Такое устройство как бы является единым кристаллом, и новую область техники не зря называют твердотельной электроникой.

Огромное значение для современной техники имеют магнитные материалы. Атомы (или часть атомов), из которых состоит твердое тело, могут обладать *магнитным моментом*. Если взаимодействие между магнитными моментами велико, то они выстраиваются определенным образом, и твердое тело переходит в ферромагнитное или антиферромагнитное состояние (см. *Магнетизм*). На рис. 6 показано расположение магнитных моментов ионов марганца в решетке оксида марганца. Вещество находится в антиферромагнитном состоянии.

Чем сложнее устроено твердое тело, тем труднее выявить коллективные эффекты. Особенно сложно устроены органические твердые тела, хотя и в них имеется определенная струк-

тура. Как именно возникает здесь упорядочение, к каким коллективным свойствам оно приводит — на эти вопросы еще предстоит ответить. Но ясно, что именно на этом пути лежит ключ к пониманию тайн живой природы.

ТЕМПЕРАТУРА

Это термодинамическая величина, определяющая степень нагретости тела. Тела, имеющие более высокую температуру, являются более нагретыми. Согласно второму закону *термодинамики*, самопроизвольный переход тепла возможен только от тел с более высокой к телам с более низкой температурой. В состоянии *теплового равновесия* температура выравнивается во всех частях сколь угодно сложной системы.

Мерой изменения температуры тела может служить изменение какого-либо свойства, зависящего от нее, например объема, электросопротивления и др. Чаще всего для измерения температуры используют изменение объема. На этом основано устройство термометров. Первый термометр был изобретен Галилеем ок. 1600 г. В качестве термометрического вещества, т. е. тела, расширяющегося при нагревании, в нем использовалась вода. Для определения температуры тела термометр приводят в соприкосновение с телом; по достижении теплового равновесия термометр показывает температуру тела.

Разные тела при нагревании расширяются по-разному, поэтому шкала термометра зависит от термометрического вещества. Для практических целей термометры градуируют по точкам плавления или кипения или каким-либо другим, лишь бы процесс происходил при постоянной температуре. Наибольшее распространение имеет стоградусная шкала (или шкала Цельсия, по имени шведского физика, предложившего ее). По этой шкале лед плавится при 0° С, а вода кипит при 100° С, и расстояние между ними делится на 100 частей, каждая из которых считается градусом.

Первоначальные конструкции термометров.

Поскольку точно воспроизвести условия плавления льда и кипения воды трудно, в международной практической температурной шкале, принятой в 1968 г., имеются и другие опорные точки, которые можно легче и точнее измерить. В результате точность измерения температур в обычных лабораториях достигает десятых процента, а в эталонных — тысячных.

В Англии и США иногда пользуются шкалой Фаренгейта, в которой температура плавления льда составляет 32°, а кипения воды 212°; во Франции — шкалой Реомюра: 0° и 80° соответственно.

Английский физик У. Томсон, анализируя *цикл Карно,* заметил, что работа этого цикла зависит только от температуры нагревателя и холодильника и не зависит от устройства тепловой машины, реализующей цикл Карно, и используемого в ней рабочего вещества. Измеряя отношение количеств теплоты, взятой от нагревателя и отданной холодильнику, можно найти отношение температур этих двух тел. Определенная таким образом шкала температур является абсолютной; она не зависит от термометрического вещества. Чтобы такой шкалой пользоваться, надо только произвольно задать одну точку на ней, одно численное значение температуры. Например, лед плавится по шкале Кельвина при 273,15 К, т. е. 0° С соответствует 273,15 К. Благодаря счастливому сте-

БИМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛАСТИНКА

Для измерения температуры можно воспользоваться биметаллической пластинкой. Такая пластинка состоит из двух металлов, например полоски из железа и приклепанной к ней полоски из цинка. Железо и цинк расширяются неодинаково. Так, 1 м железной проволоки при нагревании на 100 градусов удлиняется на 1 мм, а 1 м цинковой проволоки — на 3 мм. Поэтому, если нагревать биметаллическую пластинку, она начнет изгибаться в сторону железа.

Теперь несколько практических советов.

Возьмите полоски железа и цинка толщиной около 5 мм, длиной 15—20 см и шириной 1 см. Через каждые 1,5—2 см соедините их заклепками. Зажмите в тиски один конец биметаллической пластинки и подогрейте ее над газом. Пластинка согнется.

Дальше нужно заняться конструированием термометра, в котором используется такая пластинка.

Температуры	K	C	F
Поверхности Солнца	6000	5727	10341
Плавления вольфрама	3660	3387	6129
Плавления алюминия	933	660	1220
Плавления олова	505	232	450
Кипения воды	373	100	212
Плавления воска	337	64	147
Человеческого тела	310	37	98
Плавления льда	273	0	32
Плавления ртути	234	− 39	− 38
Кипения кислорода	90	− 183	− 298
Плавления кислорода	54	− 219	362
Кипения водорода	20	− 253	423
Плавления водорода	14	− 259	434
Кипения гелия	4,2	268,8	452

чению обстоятельств (все *газы* при малых плотностях расширяются при нагревании одинаково) абсолютная шкала практически совпадает со шкалой газового термометра.

В настоящее время методами магнитного охлаждения получены очень низкие, близкие к абсолютному нулю температуры в несколько милликельвинов и очень высокие — в миллионы кельвинов (в термоядерной *плазме*).

Из *кинетической теории* следует, что средняя кинетическая энергия поступательного теплового движения молекулы равна $\frac{3}{2}kT$, где T — абсолютная температура в кельвинах, а k — постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К). Таким образом, абсолютная температура с точностью до постоянного множителя совпадает со средней энергией теплового движения молекул. С этой точки зрения понятие температуры, как и другие термодинамические понятия, имеет смысл только для макроскопических систем, в которых возможно установление *теплового равновесия*. Понятие температуры применимо не только к телам, состоящим из атомов, молекул, ионов, но и к электронному газу, электромагнитному излучению (фотонному газу), *атомным ядрам* и т. д.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Существуют два типа физиков — экспериментаторы и теоретики. Эти две профессии почти никогда не совмещаются в одном лице. Физики-экспериментаторы исследуют соотношения между физическими величинами, или, говоря более торжественно, открывают законы природы, пользуясь экспериментальными установками, т. е. измеряя физические величины с помощью приборов. Для того чтобы знать, как и что измерять, надо глубоко понимать связи между изучаемыми явлениями.

Физики-теоретики изучают природу, пользуясь только бумагой и карандашом, иначе говоря, выводят математически новые соотношения между наблюдаемыми величинами, опираясь на найденные ранее экспериментально и теоретически законы природы.

Причина разделения этих двух профессий не только в том, что каждая из них требует своих специальных знаний — знаний методов измерения — в одном случае и владения математическим аппаратом — в другом. Главная причина разделения в том, что эти профессии требуют разных типов мышления и разных форм интуиции. Между тем интуиция, т. е. способность подсознательно находить правильный путь, играет важнейшую роль, особенно на первых стадиях работы. Поскольку теоретическая физика имеет дело с более отвлеченными понятиями, чем *физика экспериментальная*, физику-теоретику требуется более абстрактная форма интуиции, близкая иногда к интуиции математика.

В прошлом веке, когда физика не была еще так специализирована, многие физики совмещали обе профессии. Так, Дж. Максвелл, который получил теоретически удивительные уравнения, объединившие электричество, маг-

нетизм и оптику, занимался и экспериментальными работами. Г. Герц, обнаруживший экспериментально *электромагнитные волны*, был одновременно и хорошим теоретиком. И все-таки в каждом случае можно указать, какая из профессий главная: для Максвелла это теоретическая физика, а для Герца — физика экспериментальная.

Великим физиком-теоретиком был А. Эйнштейн. Пользуясь только бумагой и карандашом, он создал *теорию относительности,* согласно которой *время* течет по-разному в неподвижной системе и в системе, равномерно движущейся относительно наблюдателя. Как показали эксперименты последних десятилетий, быстро движущиеся нестабильные частицы (например, пи-мезоны или мюоны) распадаются медленнее, чем неподвижные, в точном соответствии с формулой, полученной Эйнштейном. При скорости, приближающейся к скорости света, время жизни частицы неограниченно возрастает.

Замечательный итальянский физик Э. Ферми наряду со многими другими теоретическими работами создал теорию радиоактивного распада (см. *Радиоактивность*) и вместе с физиками своей группы открыл экспериментально, что почти все химические элементы делаются радиоактивными при бомбардировке *нейтронами.* Но и в этом случае можно указать главную профессию — это теоретическая физика.

Прекрасным теоретиком, тесно связанным с экспериментом, был советский академик Г. И. Будкер, у которого теоретическая физика совмещалась с замечательными инженерными идеями. Он теоретически разработал ускоритель на встречных пучках заряженных частиц и руководил его созданием в Новосибирском академгородке. В таком ускорителе вся энергия идет на рождение частиц, тогда как при столкновении энергичной частицы с неподвижной мишенью на рождение новых частиц идет только малая доля энергии.

Стиль и способ подхода к решению задач различны у разных физиков-теоретиков. Есть теоретики, для которых несущественно, каким способом получен результат, лишь бы цель была достигнута. Но есть и такие, которые любят методику теоретической работы и добиваются того, чтобы результат был получен не искусственным путем, а методом, наиболее со-

ИГОРЬ ЕВГЕНЬЕВИЧ ТАММ (1895 — 1971)

Игорь Евгеньевич Тамм — советский физик, академик, Герой Социалистического Труда.

Родился во Владивостоке, в семье инженера. По окончании в 1918 г. Московского университета преподавал в ряде вузов нашей страны. В 1924 г. начал преподавательскую деятельность в Московском университете. С 1934 г., оставаясь профессором университета, Тамм возглавлял теоретический отдел Физического института Академии наук СССР.

В 1930 г. Тамм построил квантовую теорию рассеяния света в кристаллах. При этом он впервые ввел в теоретическую физику понятие о квантах колебательного движения атомов кристалла, названных *фононами.* Фонон был первой из так называемых *квазичастиц,* представления о которых широко использует современная *теоретическая физика.*

В 1934 г. ученый начал цикл работ о природе ядерных сил, удерживающих внутри ядра *протоны* и *нейтроны.* Он первый предположил, что эти силы имеют обменный характер: они возникают в результате непрерывного обмена какими-то частицами, которые протоны и нейтроны испускают и поглощают. Тамм математически развил количественную теорию ядерных сил, впоследствии способствовавшую созданию современной мезонной теории ядерных сил (см. *Адроны*).

В 1937 г. И. Е. Тамм и советский физик И. М. Франк создали теорию излучения *электрона* при его движении со скоростью, больше скорости света в среде (см. *Вавилова—Черенкова эффект*).

И. Е. Тамм много работал над проблемами физики горячей *плазмы* и управляемых термоядерных реакций. Он один из авторов идеи удержания горячей плазмы при помощи сильных магнитных полей, на основе которой созданы разнообразные экспериментальные термоядерные установки (см. *Термоядерный синтез, Токамак*).

Написанный И. Е. Таммом курс «Основы теории электричества» выдержал 8 изданий.

В 1946 и 1953 г. Тамм был удостоен Государственной премии СССР, в 1958 г.— Нобелевской премии.

И. Е. Тамм создал школу физиков-теоретиков, к которой принадлежат многие известные советские ученые.

ответствующим задаче. Этим достигается более глубокое понимание, а следовательно, и бóльшая достоверность результатов. Существуют абстрактные физики-теоретики, решающие задачи, не связанные непосредственно с опытом; и физики-теоретики, работающие в тесном контакте с экспериментаторами. Для таких теоретиков заметную часть работы составляет теоретический анализ эксперимента, уже сделанного или предполагаемого. Наряду с теоретиками, предпочитающими строгий математический подход, к сожалению редко возможный при анализе реальных явлений (см. *Физика и математика*), существуют физики, для которых важнее подход качественный, когда результаты получаются сначала на упрощенных моделях и по возможности наглядно.

Среди физиков нашей страны наиболее ярким примером теоретика, сочетавшего глубокое качественное понимание явлений с виртуозным математическим аппаратом, был Л. Д. Ландау. В. А. Фок добивался максимально строгой постановки вопроса. Он получил важнейшие результаты в квантовой теории, решая задачи, допускающие строгую математическую формулировку. И. Е. Тамм сочетал различные стили: иногда это были работы по изучению приближенных моделей явления, а иногда, как и у Л. Д. Ландау, исследования сложной физической задачи приближенными методами. Н. Н. Боголюбов представляет собой редкий пример сочетания двух профессий — математика и теоретического физика. Для него характерно строгое исследование созна-

ЛЕВ ДАВЫДОВИЧ ЛАНДАУ (1908 — 1968)

Советский физик, академик, Герой Социалистического Труда, Лев Давыдович Ландау родился в Баку, в семье инженера-нефтяника. С ранних лет он увлекался точными науками и очень любил математику. Еще будучи школьником, он самостоятельно изучил математический анализ. Впоследствии он не раз говорил, что не помнит себя не умеющим дифференцировать и интегрировать. В тринадцать лет он уже окончил среднюю школу.

В 1922 г. Ландау поступил в Бакинский университет, а через два года перевелся на физическое отделение Ленинградского университета.

В 1927 г. он стал аспирантом Ленинградского физико-технического института, а вскоре выехал в командировку за границу и работал в Дании, Англии, Швейцарии. Наибольший след в его жизни оставило пребывание в Копенгагене, где в Институте теоретической физики у выдающегося датского ученого Нильса Бора собирались ведущие физики-теоретики из многих стран. Вернувшись на родину, Л. Д. Ландау в 1932 г. возглавил теоретический отдел Украинского физико-технического института в Харькове и кафедру общей физики в Харьковском университете.

С этого времени Ландау начал создавать свою научную школу. Здесь, в Харькове, он разработал теоретический минимум, которым, по его мнению, должен свободно владеть каждый физик-теоретик. Позднее на этой основе возник всемирно известный многотомный курс теоретической физики, который Л. Д. Ландау создал вместе со своим учеником — академиком Е. М. Лифшицем. Эта работа в 1962 г. была удостоена Ленинской премии.

В 1934 г. по инициативе академика П. Л. Капицы был создан Институт физических проблем. С 1937 г. Л. Д. Ландау руководит теоретическим отделом института. В Москве он прожил все последующие годы, создал свои основные научные труды, в которых рассматривались вопросы теории *сверхтекучести*, *сверхпроводимости*, *фазовых переходов*, квантовых жидкостей и т. д.

Как физик-теоретик Ландау был необычайно универсален. Гидродинамика и статистическая физика, физика *плазмы*, *атомного ядра* и *твердого тела*, *магнетизм* и *низкие температуры* — все было подвластно его выдающемуся уму. В 1962 г. за разработку основополагающей теории конденсированных фаз (и, в частности, жидкого гелия) он был удостоен Нобелевской премии.

Ученый мечтал написать книги об основах физики для самых разных читателей. Он успел создать первые тома «Курса общей физики» и «Физики для всех». Школьникам особенно интересно познакомиться с его книгой «Что такое теория относительности» (написанной в соавторстве с Ю. Б. Румером), в которой основные идеи этой увлекательной теории изложены без единой формулы.

Л. Д. Ландау был избран членом многих академий наук мира. Именем его назван Институт теоретической физики Академии наук СССР.

тельно упрощенных моделей явления. И. Я. Померанчук ставил своей целью находить такие вопросы и строить теорию таких явлений, которые вскрывают самые глубинные свойства физического мира. Поэтому его работы всегда оказывались на переднем крае науки. Большое влияние на развитие многих областей теоретической физики оказал замечательный физик Я. И. Френкель. Ему принадлежит громадное число физических идей, которые он выдвигал, не стремясь довести работу до конца, ограничиваясь качественным рассмотрением задач.

Теоретическая физика как отдельная наука началась с И. Ньютона, который превратил идею всемирного *тяготения* в физическую теорию, подтвержденную опытом. Надо было объяснить, почему планеты движутся по эллипсам с фокусом в месте нахождения Солнца и почему кубы радиусов орбит пропорциональны квадратам периодов обращения. Ньютон доказал, что это следует из предположения, что между двумя *массами* действует *сила*, пропорциональная произведению масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между телами. Но и после введения силы тяготения нужно было преодолеть колоссальные по тому времени математические трудности, чтобы получить количественное объяснение движения планет с учетом возмущений, вызванных влиянием соседних небесных тел. Ньютон вычислил возмущения движения Луны под влиянием Солнца и построил теорию приливов, которые он объяснил лунным притяжением.

Наконец, перечислим главные направления развития теоретической физики.

Это, прежде всего, получение количественных соотношений между наблюдаемыми величинами. Так, например, пользуясь законами движения *электронов* в *металле*, теоретики рассчитали кривую зависимости электрического сопротивления от температуры и объяснили природу *сверхпроводимости*.

Другое направление — это создание адекватных методов математического описания законов природы. Сюда входят использование и развитие тех методов математики, которые позволяют выявить свойства *симметрии законов природы*. Количественное завершение идей общей теории относительности (теории тяготения) стало возможным только в результате применения методов описания величин в пространстве с геометрическими свойствами, изменяющимися от точки к точке. Для многих задач теоретической физики наиболее подходящий способ — решение их с помощью электронных вычислительных машин.

И наконец, самое главное направление — это отыскание тех общих принципов, которые лежат в основе законов природы, таких, как причинность, свойства симметрии, законы сохранения... *Квантовая механика* обобщила понимание причинности классической физики: *теория относительности* основывается на симметрии пространства-времени; теория *элементарных частиц* покоится на «внутренней» симметрии явлений.

Итак, теоретическая физика намечает пути к пониманию единства, симметрии и динамики явлений природы, т. е. пути к пониманию красоты Вселенной.

Однако любые теоретические построения делаются научной истиной, только если они подтверждаются экспериментом и дальнейшим развитием теории. Подтверждение или опровержение теоретических предсказаний на опыте входит в задачу *экспериментальной физики*.

Молодой человек, интересующийся физикой, должен как можно раньше решить для себя, какую из двух профессий — теоретическую или экспериментальную — он выбирает.

ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

Согласно второму закону *термодинамики*, во всякой изолированной (т. е. не испытывающей никаких воздействий со стороны других тел) системе самопроизвольно протекают только такие процессы, которые приводят ее в состояние, не изменяющееся в дальнейшем с течением времени. Такое состояние системы называется *тепловым равновесием*. Оно может достигаться в системе и тогда, когда она не является изолированной, но находится в неизменных внешних условиях.

Хорошо известный пример: тепло всегда переходит от горячего тела к холодному, пока температуры обоих тел не станут одинаковыми и не установится тепловое равновесие.

Однако понятие теплового равновесия значительно сложнее, чем только выравнивание температур благодаря переносу тепла. Вот другой, тоже типичный пример. Поместим воду в пустой сосуд и наглухо его закроем. Вода начнет испаряться, и внутри сосуда возникнет некоторое количество водяного пара. Оно будет увеличиваться до тех пор, пока не установится тепловое равновесие, после чего останется постоянным. Изменим внешние условия: увеличим температуру. Количество водяного пара и его давление снова начнут расти, пока не установится новое тепловое равновесие, отвечающее новой температуре. Каждому новому тепловому равновесию будет соответствовать вполне определенное, равновесное давление водяного пара.

С точки зрения *кинетической теории*, состояние теплового равновесия возникает как результат равенства скоростей прямого и обратного процессов. В рассмотренном примере — равенства скоростей *испарения* и *конденсации*. Следует подчеркнуть, что равенство это выпол-

няется лишь в среднем (для не слишком малых промежутков времени и не слишком малых объемов); при переходе к малым временам и к малым объемам наблюдаются отклонения от теплового равновесия, или *флуктуации*, обусловленные неточным совпадением скоростей противоположно направленных элементарных процессов в каждый данный момент.

Еще пример. Возьмем смесь газов (водорода и хлора) при некоторой температуре. Вследствие химической реакции между газами в системе начнется образование хлористого водорода: $H_2 + Cl_2 = 2HCl$. Давление хлористого водорода будет расти, а водорода и хлора — падать, пока не установится тепловое равновесие. В дальнейшем парциальные давления всех трех газов не меняются. Как следует из второго закона термодинамики, в состоянии теплового равновесия все три давления связаны между собой определенным соотношением: $P^2_{HCl}/P_{H_2}P_{Cl_2} = \text{const}$. Значение этой постоянной зависит только от температуры.

Состояние теплового равновесия устойчиво. Если мы в предыдущем примере, после того как установилось тепловое равновесие, добавим в систему один из газов, то нарушим равновесие, но оно установится снова. Например, если добавить HCl, он будет превращаться в H_2 и Cl_2, пока отношение парциальных давлений газов не окажется опять таким же, как в вышеуказанном соотношении.

Понятие теплового равновесия применимо, таким образом, не только к выравниванию температуры вследствие переноса тепла — первый пример, к *фазовым превращениям* — второй пример или к химическим реакциям — третий пример, но и к любым явлениям природы — физическим, химическим, биологическим, космическим — в любых системах, подчиняющихся первому и второму законам термодинамики.

Итак, любая система при неизменных внешних условиях с течением времени всегда приходит в состояние теплового равновесия и никогда самопроизвольно из него не выходит.

Термодинамика устанавливает критерии теплового равновесия. Американский физик Дж. У. Гиббс, один из создателей классической и статистической термодинамики, придумал для расчета равновесий метод термодинамических потенциалов, или характеристических функций. Согласно Гиббсу, существуют такие функции, которые в состоянии теплового равновесия достигают минимума, т. е. наименьших возможных при данных условиях значений. Например, если процесс проходит при заданных температуре и давлении, то в состоянии теплового равновесия минимума достигает так называемая свободная энергия Гиббса; в теплоизолированной системе, находящейся при постоянном объеме,— внутренняя энергия и т. д. Самопроизвольно процессы идут в таком направлении, что указанные функции убывают, достигая минимума в состоянии теплового равновесия.

Функции, являющиеся критериями равновесия, можно рассчитать двумя способами: с помощью законов *термодинамики,* на основании опытных данных о теплотах процессов — испарения, химической реакции и др., теплоемкостях и т. д., а также с помощью *кинетической теории* (на основании сведений о свойствах частиц — массах, моментах инерции, частотах колебаний и т. д.).

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

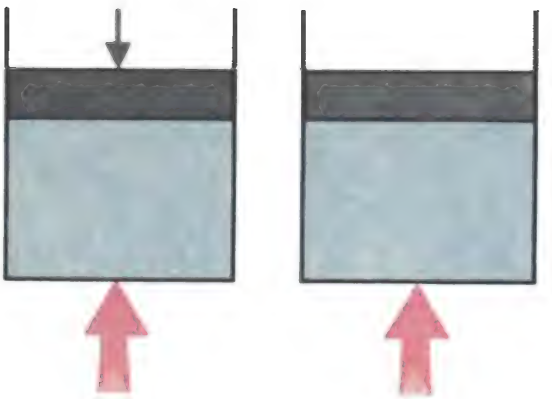
Теплоемкостью тела называют количество теплоты, которое нужно сообщить данному телу, чтобы повысить его температуру на один градус. При остывании на один градус тело отдает такое же количество тепла. Теплоемкость пропорциональна *массе* тела. *Теплоемкость* единицы массы тела называется удельной, а произведение удельной теплоемкости на атомную или молекулярную массу — соответственно атомной или молярной.

Теплоемкости различных веществ сильно различаются между собой. Так, удельная теплоемкость воды при 20° С составляет 4200 Дж/кг К, соснового дерева — 1700, воздуха — 1010. У *металлов* она меньше: алюминия — 880 Дж/кг К, железа — 460, меди — 385, свинца — 130. Удельная теплоемкость слабо растет с температурой (при 90° С теплоемкость воды составляет 4220 Дж/кг К) и сильно меняется при *фазовых превращениях*: теплоемкость льда при 0° С в 2 раза меньше, чем воды; теплоемкость водяного пара при 100° С около 1500 Дж/кг К.

Теплоемкость зависит от условий, в которых происходит изменение температуры тела. Если размеры тела не меняются, то вся теплота идет на изменение внутренней энергии. Здесь говорится о теплоемкости при постоянном объеме (C_V). При постоянном внешнем давлении благодаря тепловому расширению совершается механическая работа против внешних сил, и нагревание на ту или иную температуру требует большего тепла. Поэтому теплоемкость при постоянном давлении C_p всегда больше, чем C_V. Для идеальных газов $C_p - C_V = R$ (см. рис.), где R — газовая постоянная, равная 8,32 Дж/моль К.

Обычно измеряется C_p. Классический способ измерения теплоемкости следующий: тело, теплоемкость которого (C_x) хотят измерить, нагревают до определенной температуры t_x и помещают в калориметр с начальной температурой t_o, наполненный водой или другой жидкостью с известной теплоемкостью ($C_к$ и $C_ж$ — теплоемкости калориметра и жидкости). Измеряя температуру в калориметре после уста-

Тепло можно сообщить телу, приложив к нему постоянное давление (тогда тело увеличивает свой объем) или зафиксировав его размеры — при постоянном объеме; в первом случае теплоемкость больше: $C_p > C_v$.



новления теплового равновесия (t), можно вычислить теплоемкость тела по формуле:

$$C_x = \frac{(t - t_0)(C_ж m_ж + C_к m_к)}{m_x(t_x - t)}$$

где m_x, $m_ж$ и $m_к$ — массы тела, жидкости и калориметра.

Наиболее развита теория теплоемкости *газов*. При обычных температурах нагревание приводит в основном к изменению энергии поступательного и вращательного движения молекул газа. Для молярной теплоемкости одноатомных газов C_V теория дает $3R/2$, двухатомных и многоатомных — $5R/2$ и $3R$. При очень низких температурах теплоемкость несколько меньше из-за квантовых эффектов (см. *Квантовая механика*). При высоких температурах добавляется колебательная энергия, и теплоемкость многоатомных газов растет с ростом температуры.

Атомная теплоемкость кристаллов, по классической теории, равна $3R$, что согласуется с эмпирическим законом Дюлонга и Пти (установлен в 1819 г. французскими учеными П. Дюлонгом и А. Пти). Квантовая теория теплоемкости приводит к такому же выводу при высоких температурах, но предсказывает уменьшение теплоемкости при понижении температуры. Вблизи абсолютного нуля теплоемкость всех тел стремится к нулю (третий закон *термодинамики*).

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплопроводность — это передача тепла в телах, не сопровождаемая перемещением составляющих их частиц. Этим обычная теплопроводность отличается от так называемой конвективной, при которой перенос тепла осуществляется благодаря перемешиванию достаточно больших объемов вещества. Типичный пример конвективной теплопроводности — перемещение массы теплого воздуха от костра или от печки. Перенос тепловой энергии путем теплопроводности совершается под влиянием разности температур.

Математическая теория теплопроводности была создана французским физиком и математиком Ж. Фурье. Теория Фурье рассматривает вещество как сплошную среду, не интересуясь его молекулярным строением. Это значит, что она описывает передачу тепла на расстояниях, больших по сравнению с длиной свободного пробега молекул (и тем более с расстоянием между ними). Работа Фурье «Аналитическая теория тепла» (1822) основана на следующем опытном факте. Если имеется однородная плоская стена толщиной $x_2 - x_1$ и температуры поверхностей стены составляют T_2 и T_1, соответственно, то количество тепла Q, передаваемое за время τ через площадку S поверхности стены, равно:

$$Q = \lambda \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} S \cdot \tau,$$

где λ — коэффициент теплопроводности, или просто теплопроводность. Далее Фурье предложил уравнения, которые позволяют рассчитать распределение температур в стене для различных моментов времени.

Теплопроводность является мерой быстроты выравнивания температур различных точек тела, или мерой количества переносимого тепла при заданной разности температур и толщине стены. Чем больше теплопроводность, тем скорее тело приближается к состоянию *теплового равновесия*.

Теплопроводность характеризует данное вещество, его природу и физическое состояние. В анизотропных телах она зависит от направления распространения тепла. Наилучшие проводники тепла — *металлы*, в которых перенос тепла, как и перенос электричества, осуществляется главным образом свободными *электронами*. Именно поэтому для всех металлов отношение теплопроводности к электропроводности при данной температуре есть величина постоянная (закон Видемана — Франца).

При плавлении *металлов* теплопроводность, как правило, падает скачком при температуре плавления. *Газы* обладают наименьшей теплопроводностью по сравнению с *твердыми телами* и *жидкостями*. Жидкости обычно проводят тепло намного хуже твердых тел. Так, теплопроводность воды составляет 0,63, а твердой меди (правда, одного из самых лучших проводников тепла) — 385 Дж/м·с·К, в 600 раз больше. Исключение представляет жидкий гелий — ниже 2,19 К, так называемый гелий II. При охлаждении ниже этой температуры тепло-

проводность жидкого гелия возрастает примерно в 3 млн. раз: он начинает передавать тепло несравненно лучше меди. Этот эффект был обнаружен нидерландским физиком В. Кеезомом и объяснен советским ученым Л. Д. Ландау. Это особый вид теплопроводности, не связанной ни с движением жидкости как целого, ни с конвекцией (перемешиванием). Высокая теплопроводность объясняется особенностями гелия II как квантовой жидкости, состоящей из двух компонент — сверхтекучей и нормальной (см. *Сверхтекучесть*).

ТЕРМОДИНАМИКА

Слово термодинамика состоит из двух греческих слов: «терме» — «теплота» и «динамис» — «сила». Термодинамика возникла как наука о процессах, происходящих в тепловых машинах: паровых котлах, двигателях внутреннего сгорания и т. д., т. е. как наука о превращении тепла в механическое *движение*, в *работу*. И до сих пор один из ее разделов занимается изучением этих вопросов, только это уже и теория реактивных двигателей, и ядерных реакторов, и многое другое.

В процессе своего развития термодинамика необычайно расширилась и приобрела характер фундаментальной физической науки. Ныне объектом ее исследования являются практически любые процессы превращения *материи*, связанные с выделением или поглощением энергии, совершением работы, переносом вещества и т. п. Термодинамика изучает процессы расширения и сжатия, нагрева и охлаж-

дения, *плавления* и затвердевания, *испарения* и конденсации, химические реакции, тепловое излучение и т. д.

По отношению ко всем этим процессам термодинамика отвечает на три главных вопроса:

1) Возможен ли данный процесс при данных условиях?

2) Если процесс возможен, то в каком направлении (тоже, конечно, при данных условиях) он пойдет?

3) Чем процесс закончится? Это окончательное, не зависящее уже от времени состояние термодинамика называет состоянием *теплового равновесия*.

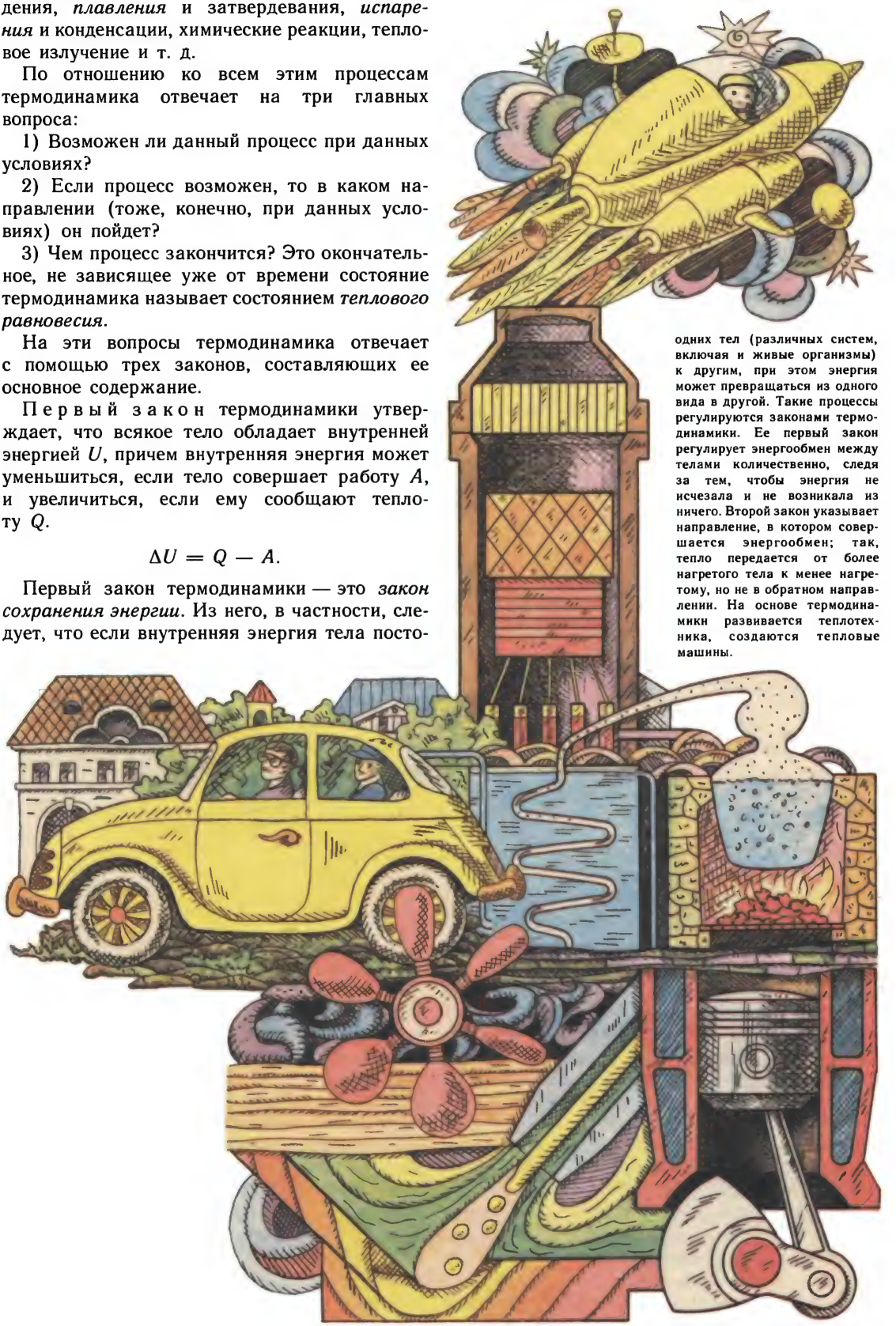
На эти вопросы термодинамика отвечает с помощью трех законов, составляющих ее основное содержание.

Первый закон термодинамики утверждает, что всякое тело обладает внутренней энергией U, причем внутренняя энергия может уменьшиться, если тело совершает работу A, и увеличиться, если ему сообщают теплоту Q.

$$\Delta U = Q - A.$$

Первый закон термодинамики — это *закон сохранения энергии*. Из него, в частности, следует, что если внутренняя энергия тела посто-

Везде в окружающем нас мире непрерывно совершаются процессы перехода энергии от одних тел (различных систем, включая и живые организмы) к другим, при этом энергия может превращаться из одного вида в другой. Такие процессы регулируются законами термодинамики. Ее первый закон регулирует энергообмен между телами количественно, следя за тем, чтобы энергия не исчезала и не возникала из ничего. Второй закон указывает направление, в котором совершается энергообмен; так, тепло передается от более нагретого тела к менее нагретому, но не в обратном направлении. На основе термодинамики развивается теплотехника, создаются тепловые машины.



янна $\Delta U = 0$ и тело не получает и не отдает тепла $Q = 0$, то оно не может совершать работу: $A = 0$. Таким образом, нельзя получить работу из ничего или превратить ее ни во что. Устройство или машину, получающую работу из ничего, называют вечным двигателем первого рода. Первый закон термодинамики отвергает вечный двигатель первого рода.

Установление этого закона в основном связано с именами немецкого врача Ю. Майера, который около 1842 г. впервые пришел к идее о возможности взаимного превращения тепла и работы, английского физика Дж. Джоуля, который в 1843 г. первым вычислил механический эквивалент теплоты, и немецкого ученого Г. Гельмгольца, сформулировавшего в 1847 г. первый закон и понявшего его всеобщий смысл как закона сохранения энергии.

Идея второго закона термодинамики связана с именем французского инженера С. Карно, который в 1824 г. разработал *цикл Карно* — круговой процесс в тепловой машине, в результате которого тело, совершив работу, затем возвращается в исходное состояние, используя часть этой работы. Он впервые показал, что полезную работу можно получить лишь в случае, когда тепло передается от нагретого тела к более холодному.

Развивая идеи Карно, английский физик У. Томсон в 1851 г. сформулировал второй закон: «В природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, полученная за счет охлаждения теплового резервуара». Эта формулировка показывает, что взаимное превращение тепла и работы неравноценно: работу можно полностью превратить в тепло (путем трения, нагрева электрическим током и другими способами), а тепло полностью превратить в работу нельзя. Машину, многократно и полностью превращающую тепло в работу, называют вечным двигателем второго рода. Второй закон отвергает вечный двигатель второго рода.

Независимо от У. Томсона формулировку второго закона в 1850 г. дал немецкий физик Р. Клаузиус: «Теплота не переходит самопроизвольно от холодного тела к более горячему». Эта формулировка подчеркивает односторонность реальных процессов. Действительно, первый закон термодинамики не запрещает указанный переход тепла (лишь бы выполнялся закон сохранения энергии), однако этого никогда не происходит. Мы знаем много других примеров односторонности процессов: газы перемешиваются в сосуде, но сами не разделяются; кусок сахара растворяется в воде, но не выделяется обратно в виде куска; можно нагреть проволоку от аккумулятора, но нельзя (к огорчению автомобилистов!) зарядить аккумулятор от нагретой проволоки и т. д.

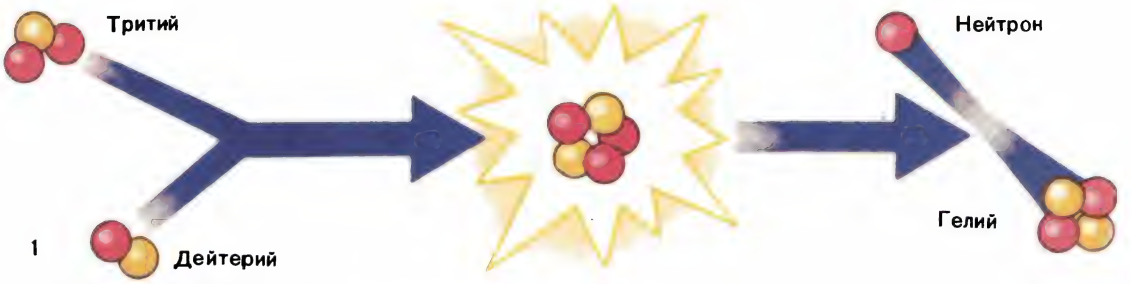
Клаузиус решил вопрос о направлении самопроизвольных процессов в 1865 г., когда ввел новую функцию — *энтропию*, установив ее важнейшую особенность: в теплоизолированных системах самопроизвольно процессы идут в сторону увеличения энтропии; в состоянии *теплового равновесия* энтропия достигает максимума. Эта функция является мерой беспорядка в системе; таким образом, самопроизвольные процессы идут в сторону увеличения беспорядка.

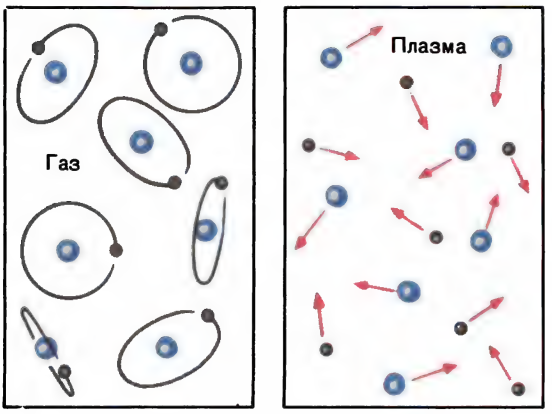
Возможность расчета абсолютной величины энтропии связана с именем немецкого физикохимика В. Нернста. В 1906 г. он установил, что, когда температура стремится к абсолютному нулю, изменение энтропии, связанное с любым превращением, также стремится к нулю. Позднее было показано, что и абсолютное значение энтропии простых кристаллических тел стремится к нулю при $T \to 0$. Это третий закон термодинамики.

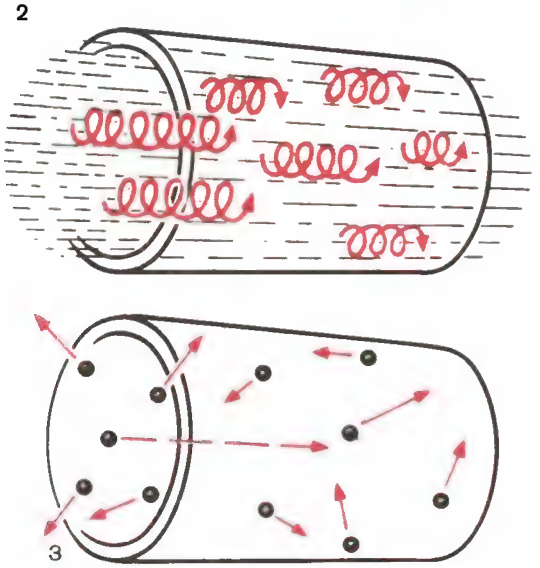
Вводя внутреннюю энергию, энтропию и другие функции, термодинамика не интересуется их природой и не связывает их с устройством тел, с тем, из каких частиц тела состоят, какими свойствами эти частицы обладают, как они взаимодействуют между собой. В ней основные законы вводятся как постулаты, являющиеся обобщением многовекового опыта человечества. Поэтому они оказываются справедливыми для любых процессов и для любых веществ: твердых, жидких, газообразных, *плазмы, металлов, полупроводников, диэлектриков* и т. д. А. Эйнштейн писал: «Теория оказывается тем более впечатляющей, чем проще ее предпосылки, чем значительнее разнообразие охватываемых ею явлений и чем шире область ее применимости. Именно поэтому классическая термодинамика производит на меня очень глубокое впечатление. Это — единственная общая физическая теория, и я убежден, что в рамках применимости своих основных положений она никогда не будет опровергнута».

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Так как между *атомными ядрами* на малых расстояниях действуют ядерные силы притяжения, при сближении двух ядер возможно их слияние, т. е. синтез более тяжелого ядра. Все атомные ядра имеют положительный электрический заряд и, следовательно, на больших расстояниях отталкиваются друг от друга. Для того чтобы ядра могли сблизиться и вступить в *ядерную реакцию* синтеза, они должны обладать достаточной кинетической энергией для преодоления взаимного электрического отталкивания, которое тем больше, чем больше заряд ядра. Поэтому проще всего осуществляется синтез легких ядер с малым электрическим







1. Схема реакции синтеза гелия из ядер дейтерия и трития. *2.* Плазма — ионизированный газ. *3.* Магнитное поле затрудняет движение заряженных частиц поперек силовых линий.

зарядом. В лаборатории реакции синтеза можно наблюдать, обстреливая мишень быстрыми ядрами, разогнанными в специальном ускорителе (см. *Ускорители заряженных частиц*). В природе реакции синтеза происходят в очень горячем веществе, например в недрах звезд, в том числе в центре Солнца, где температура 14 млн. градусов и энергия теплового движения некоторых самых быстрых частиц достаточна для преодоления электрического отталкивания. Ядерный синтез, происходящий в разогретом веществе, называют термоядерным.

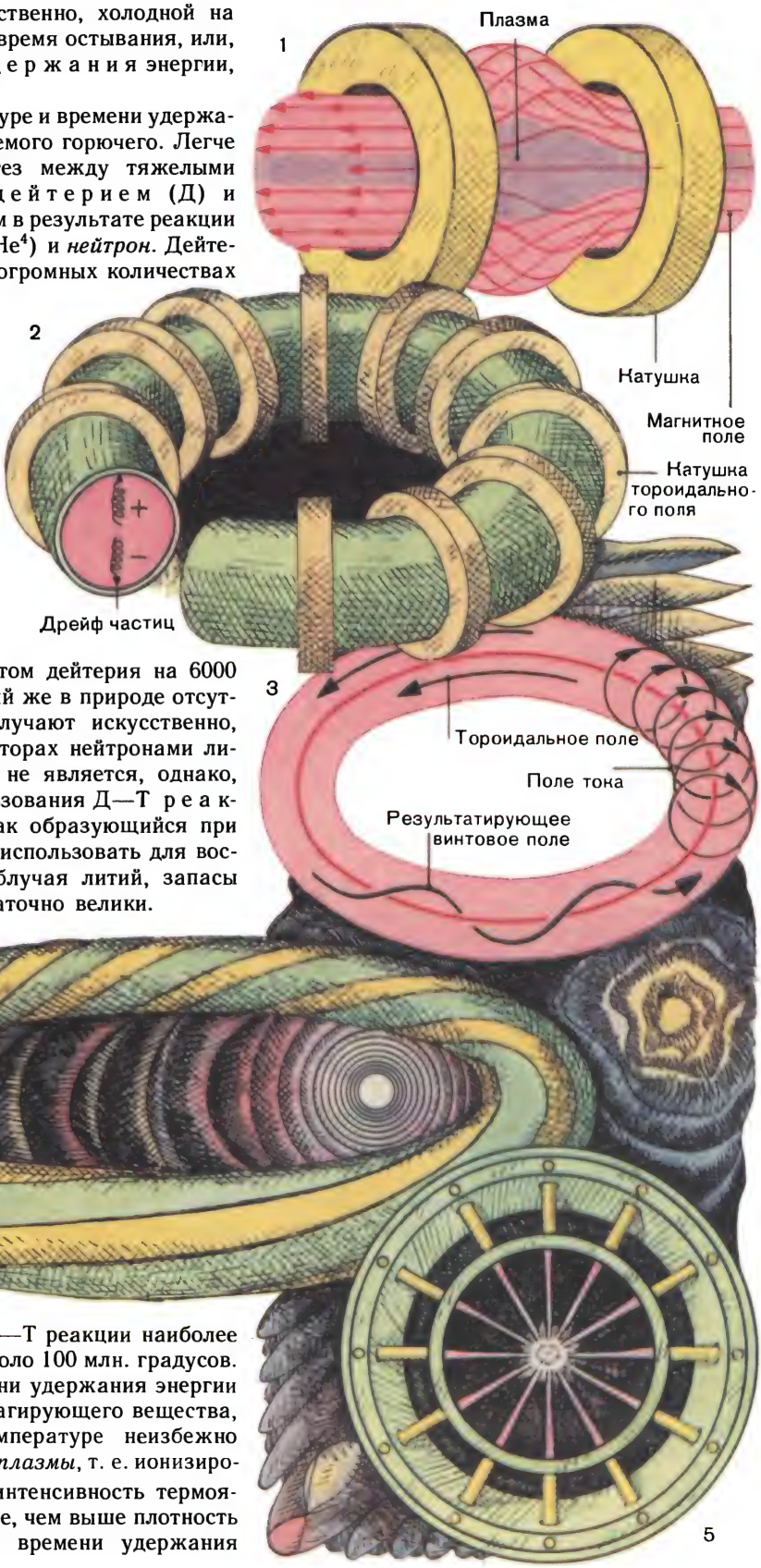
Термоядерные реакции, идущие в недрах звезд, играют очень важную роль в эволюции Вселенной. Они — источник ядер химических элементов, которые синтезируются из водорода в звездах. Они — источник энергии звезд. Основным источником энергии Солнца являются реакции так называемого протон-протонного цикла, в результате которых из 4 протонов рождается ядро гелия. Выделяющаяся при синтезе энергия уносится образующимися ядрами, квантами электромагнитного излучения, *нейтронами* и *нейтрино*. Наблюдая поток нейтрино, идущий от Солнца, можно установить, какие ядерные реакции синтеза и с какой интенсивностью происходят в его центре.

Уникальная особенность термоядерных реакций как источника энергии — очень большое энерговыделение на единицу массы реагирующих веществ — в 10 млн. раз больше, чем в химических реакциях. Вступление в синтез 1 г *изотопов* водорода эквивалентно сгоранию 10 т бензина. Поэтому ученые давно стремятся овладеть этим гигантским источником энергии. В принципе мы умеем уже сегодня получать на Земле энергию термоядерного синтеза. Нагреть вещество до звездных температур можно, используя энергию атомного взрыва. Так устроена водородная бомба — самое страшное оружие современности, в которой взрыв ядерного запала приводит к мгновенному нагреву смеси дейтерия с тритием и последующему термоядерному взрыву.

Но не к такому неуправляемому синтезу, способному погубить все живое на Земле, стремятся ученые. Они ищут способы осуществления управляемого *термоядерного синтеза*. Какие же условия должны быть для этого выполнены? Прежде всего, конечно, нужно нагреть термоядерное горючее до температуры, когда реакции синтеза могут происходить с заметной вероятностью. Но этого мало. Необходимо, чтобы при синтезе выделялось больше энергии, чем затрачивается на нагрев вещества, или, что еще лучше, чтобы рождающиеся при синтезе быстрые частицы сами поддерживали требуемую температуру горючего. Для этого нужно, чтобы вступающее в синтез вещество было надежно теплоизолировано

от окружающей и, естественно, холодной на Земле среды, т. е. чтобы время остывания, или, как говорят, время удержания энергии, было достаточно велико.

Требования к температуре и времени удержания зависят от используемого горючего. Легче всего осуществить синтез между тяжелыми *изотопами* водорода — дейтерием (Д) и тритием (Т). При этом в результате реакции получается ядро гелия (He^4) и *нейтрон*. Дейтерий имеется на Земле в огромных количествах



1. Ловушка с «магнитными пробками». *2.* Частицы уходят поперек тороидального поля из-за дрейфа. *3.* Схема установки Токамак. *4.* Винтовые обмотки тоже устраняют тороидальный дрейф. Так устроен стелларатор — замкнутая магнитная ловушка для удержания высокотемпературной плазмы. *5.* Микровзрыв мишени, облучаемой электронными пучками.

в морской воде (один атом дейтерия на 6000 атомов водорода). Тритий же в природе отсутствует. Сегодня его получают искусственно, облучая в ядерных реакторах нейтронами литий. Отсутствие трития не является, однако, препятствием для использования Д—Т реакции синтеза, так как образующийся при реакции нейтрон можно использовать для воспроизводства трития, облучая литий, запасы которого на Земле достаточно велики.

Для осуществления Д—Т реакции наиболее выгодны температуры около 100 млн. градусов. Требование же ко времени удержания энергии зависит от плотности реагирующего вещества, которое при такой температуре неизбежно будет находиться в виде *плазмы*, т. е. ионизированного газа. Так как интенсивность термоядерных реакций тем выше, чем выше плотность плазмы, требования ко времени удержания

энергии обратно пропорциональны плотности. Если выражать плотность в виде числа ионов в 1 $см^3$, то для Д — Т реакции при оптимальной температуре условие получения полезной энергии можно записать в виде: произведение плотности n на время удержания энергии τ должно быть больше 10^{14} $см^{-3}$ с, т. е. плазма с плотностью 10^{14} ионов в 1 $см^3$ должна заметно остывать не быстрее, чем за 1 с.

Так как тепловая скорость ионов водорода при требуемой температуре 10^8 см/с, за 1 с ионы пролетают 1000 км. Поэтому нужны специальные устройства, предотвращающие попадание плазмы на стенки, теплоизолирующие ее. Плазма — газ, состоящий из смеси ионов и электронов. На заряженные частицы, движущиеся поперек магнитного поля, действует сила, искривляющая их траекторию и заставляющая двигаться по окружностям с радиусами, пропорциональными импульсу частиц и обратно пропорциональными магнитному полю. Таким образом, магнитное поле может предотвратить уход заряженных частиц в направлении, перпендикулярном силовым линиям. На этом основана идея магнитной термоизоляции плазмы. Магнитное поле, однако, не препятствует движению частиц вдоль силовых линий: в общем случае частицы движутся по спиралям, навиваясь на силовые линии.

Физики придумали разные хитрости, предотвращающие уход частиц вдоль силовых линий. Можно, например, сделать «магнитные пробки» — области с более сильным магнитным полем, отражающие часть частиц, но лучше всего свернуть силовые линии в кольцо, использовать тороидальное магнитное поле. Но и одного тороидального поля, оказывается, недостаточно.

Тороидальное поле неоднородно в пространстве — его напряженность спадает по радиусу, а в неоднородном поле возникает медленное движение заряженных частиц — так называемый дрейф — поперек магнитного поля. Ликвидировать этот дрейф можно, пропустив через плазму ток вдоль обхода тора. Магнитное поле тока, складываясь с тороидальным внешним полем, сделает общее поле винтовым.

Двигаясь по спиралям вдоль силовых линий, заряженные частицы будут переходить из верхней полуплоскости тора в нижнюю и обратно. При этом они будут все время дрейфовать в одну сторону, например вверх. Но, находясь в верхней полуплоскости и дрейфуя вверх, части-

ЛЕВ АНДРЕЕВИЧ АРЦИМОВИЧ (1909 — 1973)

Советский физик, академик, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской (1958) и Государственных (1953, 1971) премий.

Родился в Москве. В 1928 г. окончил физико-математический факультет Белорусского государственного университета в Минске. С 1930 по 1944 г. работал в Физико-техническом институте в Ленинграде, а затем в Институте атомной энергии Академии наук СССР.

Основные труды Л. А. Арцимовича связаны с *атомной* и *ядерной физикой*. Он начал исследования с физики *рентгеновских лучей*, экспериментально изучив явление полного внутреннего отражения в рентгеновском диапазоне длин волн. В 1932 г. совместно с И. В. Курчатовым он исследовал одну из первых *ядерных реакций* — захват *нейтрона протоном*. В 1936 г. совместно с А. И. Алихановым и А. И. Алиханьяном Л. А. Арцимович экспериментально доказал справедливость законов сохранения энергии и импульса при аннигиляции электрона и позитрона. Это было первое подтверждение на опыте данных законов в элементарном акте квантово-механического взаимодействия, в чем многие ученые тогда сомневались. В 1935—1940 гг. Л. А. Арцимович выполнил ставший классическим цикл исследований взаимодействия быстрых *электронов* с веществом.

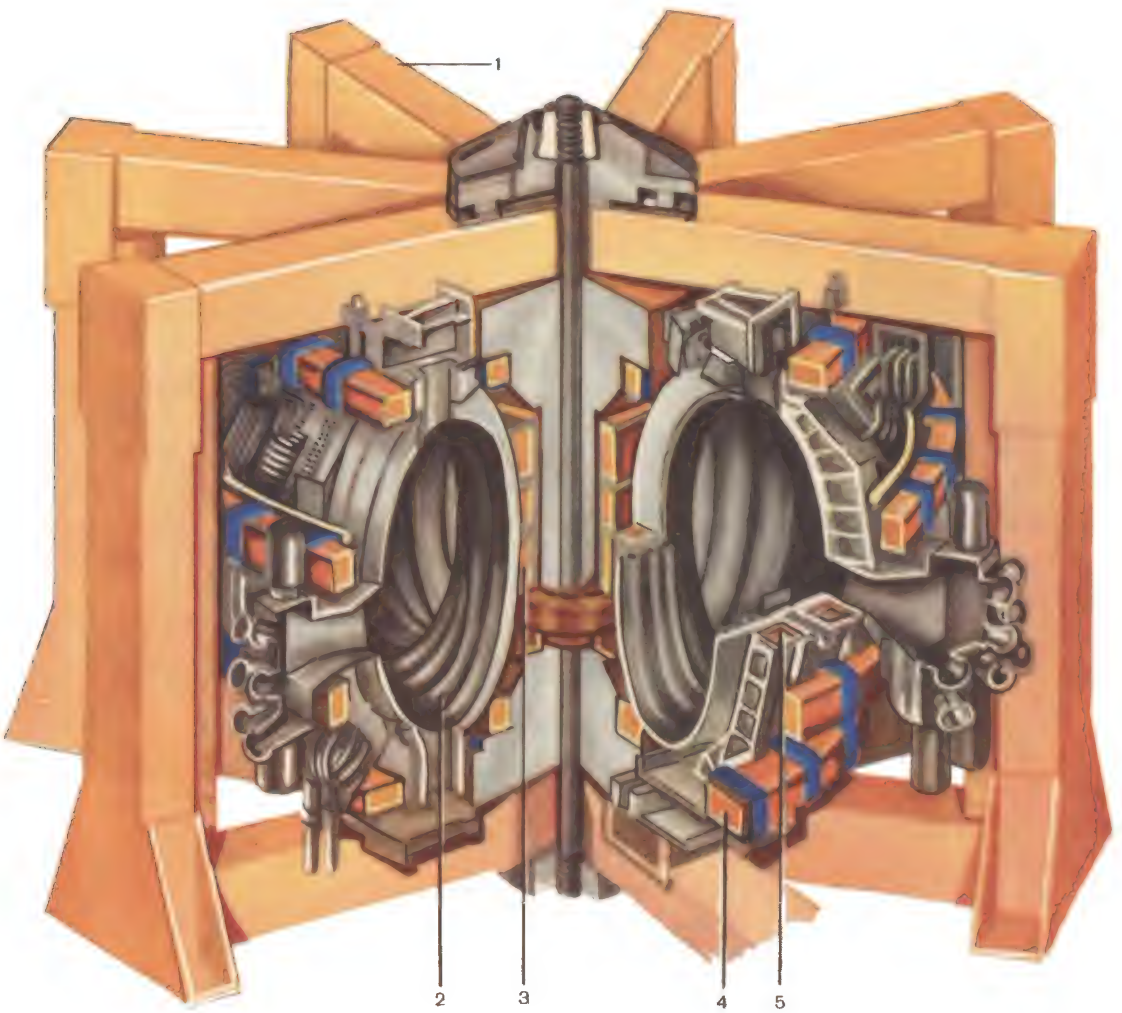
В годы Великой Отечественной войны Арцимович занимался важными для обороны страны вопросами электронной оптики, связанными с созданием приборов ночного видения. После войны, когда в нашей стране начались исследования с целью овладения атомной энергией, он возглавил одно из направлений этих исследований и успешно решил задачу разработки электромагнитного метода разделения *изотопов*.

В 1950 г. Л. А. Арцимович приступил к экспериментальному изучению проблемы управляемого *термоядерного синтеза*. Под его руководством было открыто и изучено нейтронное излучение из сильноточных газовых разрядов. В последние годы своей жизни он непосредственно руководил исследованиями на установках типа *Токамак*.

В настоящее время с использованием управляемого термоядерного синтеза связаны надежды на решение энергетических проблем, имеющих большое значение для человечества.

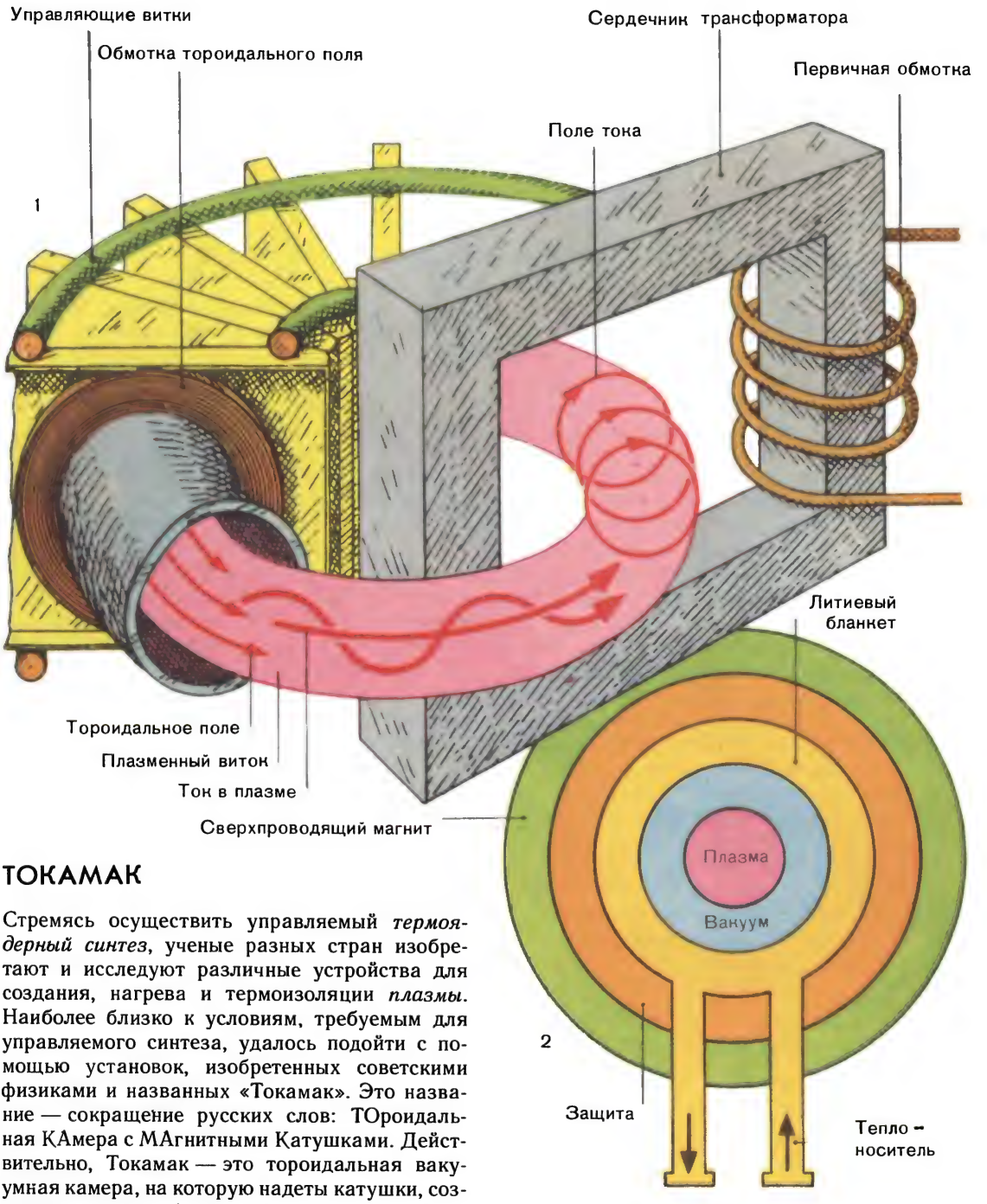
цы уходят от средней плоскости тора, а находясь в нижней полуплоскости и дрейфуя тоже вверх, частицы возвращаются к ней. Так дрейфы в верхней и нижней половинах тора взаимно компенсируются и не приводят к потерям частиц. Именно так и устроена магнитная система установок типа *Токамак,* на которых получены наилучшие результаты по нагреву и термоизоляции плазмы.

Кроме термоизоляции плазмы необходимо обеспечить также ее нагрев. В Токамаке для этой цели можно использовать ток, протекающий по плазменному шнуру. В других устройствах, где удержание осуществляется без тока, а также и в самом Токамаке для нагрева до очень высоких температур используют и иные способы нагрева, например с помощью высокочастотных *электромагнитных волн, инжекции* (введения) в плазму пучков быстрых частиц, световых пучков, генерируемых мощными *лазерами*, и т. д. Чем больше мощность нагревающего устройства, тем быстрее можно нагреть плазму до требуемой температуры. Разработка в последние годы очень мощных лазеров и источников пучков релятивистских заряженных частиц позволила нагревать малые объемы вещества до термоядерных температур за очень малое время, столь малое, что вещество успевает нагреться и вступить в реакции синтеза раньше, чем разлететься из-за теплового движения. В таких условиях дополнительная термоизоляция оказалась ненужной. Единственное, что удерживает частицы от разлета,— это их собственная *инерция.* Термоядерные устройства, основанные на этом принципе, называют устройствами с инерционным удержанием. Это новое направление исследований, которое называется инерционным термоядерным синтезом, усиленно развивается в настоящее время.



Установка типа Токамак. *1* — сердечник трансформатора; *2* — вакуумная камера; *3* — первичная обмотка; *4* — управляющие витки; *5* — обмотка тороидального поля.

Токамак. *1*. Схема установки. *2*. Поперечное сечение термоядерного реактора.



ТОКАМАК

Стремясь осуществить управляемый *термоядерный синтез*, ученые разных стран изобретают и исследуют различные устройства для создания, нагрева и термоизоляции *плазмы*. Наиболее близко к условиям, требуемым для управляемого синтеза, удалось подойти с помощью установок, изобретенных советскими физиками и названных «Токамак». Это название — сокращение русских слов: ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками. Действительно, Токамак — это тороидальная вакуумная камера, на которую надеты катушки, создающие сильное (несколько тесла) тороидальное магнитное поле. Камера с катушками ставится на железное ярмо и служит как бы вторичным витком трансформатора. При изменении тока в первичной обмотке, намотанной на ярмо, в камере возникает вихревое электрическое поле, происходит пробой и ионизация рабочего газа, заполняющего камеру, и возникает тороидальный плазменный шнур с продольным электрическим током. Этот ток нагревает плазму, а его магнитное поле вместе с полем катушек теплоизолирует плазму от стенок (см. *Термоядерный синтез*).

Любой виток с током, а плазменный особенно, стремится увеличить свой диаметр: противоположно направленные токи отталкиваются. Для компенсации этого отталкивания в Токамаке имеются специальные управляющие витки, создающие магнитное поле, перпендикулярное плоскости тора. Взаимодействие этого поля с током в шнуре дает радиальную силу, удержи-

вающую плазменный виток от расширения. Ток в витках регулируется специальной автоматической системой, следящей за положением и движением плазменного шнура.

С ростом температуры плазмы ее электрическое сопротивление не растет, как у других веществ, а падает, и при заданном токе уменьшается нагрев шнура. Увеличивать же ток в Токамаке выше некоторого предела нельзя. Если магнитное поле тока станет слишком большим по сравнению с тороидальным полем катушек, шнур начнет извиваться и выбросится на стенку. Поэтому для нагрева плазмы до температур выше 10 млн. градусов в Токамаке используют дополнительные методы нагрева с помощью инжекции в плазму пучков быстрых атомов (заряженные частицы не могли бы влететь в камеру поперек магнитного поля) или введения в камеру высокочастотных электромагнитных волн. Таким образом плазму в Токамаке уже удалось нагреть до 70 млн. градусов.

Достигнутая термоизоляция плазмы в Токамаке всего в несколько раз хуже, чем требуется для термоядерного реактора, и ее можно улучшить, увеличивая размер установки. Поэтому уже сегодня ученые разных стран приступили к проектированию экспериментального термоядерного реактора — Токамака. В таком реакторе тороидальное поле будет создаваться сверхпроводящими катушками, охлаждаемыми жидким гелием, что избавляет от затрат энергии на поддержание магнитного поля. Между катушками и плазмой размещается защита от нейтронов, рождающихся в термоядерных реакциях, и бланкет (в переводе с английского это слово значит «одеяло») — слой вещества, содержащий литий. Здесь быстрые термоядерные нейтроны тормозятся, нагревая бланкет, и вступают в ядерные реакции с литием, в результате которых воспроизводится тритий, сгоревший при термоядерном синтезе и отсутствующий в природе. Через бланкет прокачивается теплоноситель, например вода, и образуется пар, который далее поступает на турбины для выработки электроэнергии.

Термоядерный реактор — сложное сооружение. Для его проектирования и строительства потребуется еще 10 — 15 лет, так что читатели этой книги как раз успеют стать строителями и испытателями первой термоядерной электростанции.

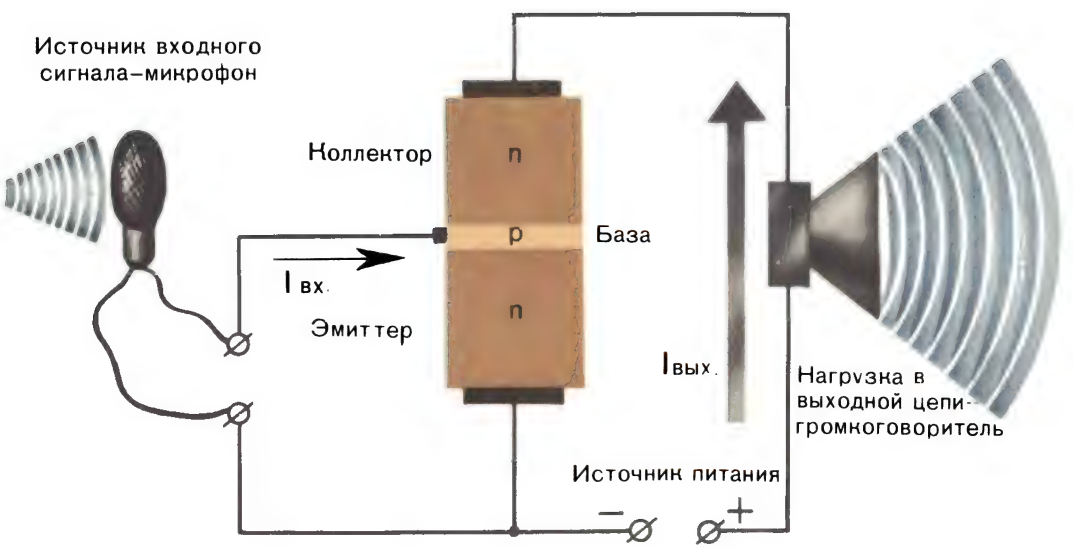
ТРАНЗИСТОР

Транзистор — полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и коммутации электрических сигналов и имеющий обычно три внешних вывода.

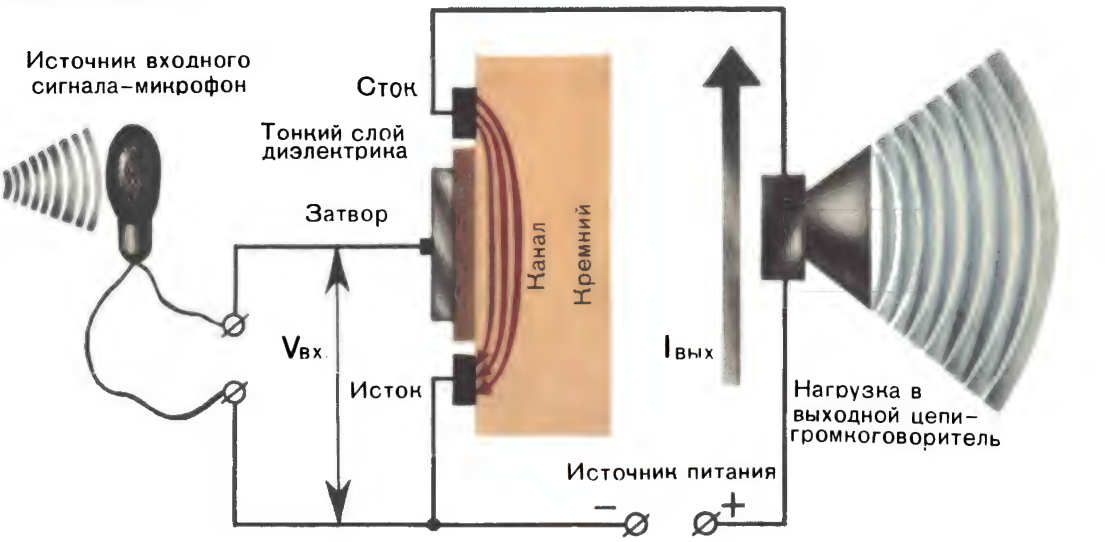
Различают два вида транзистора: биполярный и полевой.

Принцип работы биполярного транзистора основан на использовании двух электронно-дырочных переходов. Один из них обычно включен в прямом направлении (эмиттерный переход), а второй — в обратном (коллекторный переход). Эти два перехода разделены областью базы. Толщина этой области (т. е. расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами) измеряется единицами или десятыми долями микрометра. Эмиттер «впрыскивает» (инжектирует) в базу неосновные носители тока, а коллектор «отделяет» их от основных. Так эмиттерный переход управляет током через коллекторный переход. В зависимости от последовательности чередования типа электропроводности в слоях

Схематическое изображение биполярного транзистора.



Схематическое изображение униполярного транзистора.



эмиттера, базы и коллектора различают транзисторы типа $n — p — n$ и транзисторы $p — n — p$, которые отличаются обратными знаками напряжений, подводимых к их электродам.

Принцип работы полевого транзистора основан обычно на эффекте управления проводимостью приповерхностного слоя в МДП-структуре («металл — диэлектрик — полупроводник»). Электрический ток протекает в таком транзисторе от электрода, называемого истоком, к электроду, называемому стоком, через короткую (единицы и доли микрометра) область, называемую каналом. Над каналом расположен металлический управляющий электрод — затвор, с помощью которого можно изменить проводимость канала.

Возможны и иные варианты полевого транзистора: вместо структуры МДП может быть использован $p — n$ переход или контакт «металл — полупроводник» (барьер Шоттки).

В основе работы биполярного транзистора лежит обязательное использование носителей обоих знаков — электронов и дырок. Полевые транзисторы в принципе используют носители одного какого-либо знака и поэтому называются иногда униполярными.

Транзисторный эффект был открыт в 1948 г. американскими учеными Дж. Бардином и У. Браттейном. Несколько позже У. Шокли сформулировал идею биполярного плоскостного транзистора. За короткое время транзистор из прибора, работавшего только в диапазоне звуковых частот при мощностях в десятки милливатт, прошел эволюционный путь, приведший к созданию мощных (десятки и сотни ватт) и сверхвысокочастотных (до диапазона длин волн 2—3 см) транзисторов.

Кремний — основной материал для изготовления транзисторов и интегральных схем с ними. В последнее время для быстродействующих и сверхвысокочастотных транзисторов все чаще используется арсенид галлия.

Ряд положительных качеств транзистора (высокая надежность, малая потребляемая мощность, малые габариты и масса) позволил ему почти полностью вытеснить из электроники электронную лампу.

Использование транзисторов способствовало развитию интегральной электроники. В интегральной электронике на одном кристалле полупроводника одновременно изготовляется большое количество транзисторов и соединений между ними, которые представляют вполне законченное электронное устройство — интегральную микросхему. Количество транзисторов в такой схеме может быть самым различным и зависит от объема функций, выполняемых этой схемой. Так, число транзисторов на одном кристалле электронных наручных часов может составлять 1—3 тыс., в электронных клавишных вычислительных машинах (калькуляторах) — от 6 до 40 тыс. штук.

ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Так называют химические элементы, которые располагаются в *периодической системе* за ураном. После открытия *нейтрона* (1932) Э. Ферми со своими коллегами в Италии, а также некоторые ученые в других странах полагали, что при облучении урана нейтронами должны образовываться *изотопы* первых трансурановых элементов. Но достоверно доказать это не удалось, хотя, как выяснилось впоследствии, атомы элементов с $Z = 93$ и 94, действительно, синтезировались. Здесь протекали

следующие ядерные реакции: $^{238}_{92}U + n \rightarrow$ $\rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}93$ и ${}^{239}93 \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}94$

В 1940 г. американские ученые Э. Макмиллан и Ф. Эйблсон с помощью подобной ядерной реакции синтезировали нептуний (порядковый номер 93) и изучили его важнейшие химические и радиоактивные свойства. Тогда же произошло открытие и следующего трансуранового элемента — плутония. Оба новых элемента были названы в честь планет Солнечной системы — Нептуна и Плутона.

Первые синтезированные изотопы этих элементов имеют незначительные величины периодов полураспада (2,3 сут — для нептуния-239 и примерно 50 лет — для плутония-238). Но даже их самые долгоживущие изотопы характеризуются продолжительностью жизни, значительно меньшей, чем возраст Земли. Вот почему с трансурановыми элементами удалось познакомиться, только приготовив их посредством ядерного синтеза, и к настоящему времени ученые довели этот процесс до элемента с $Z = 107$.

Синтезы новых трансурановых элементов становились сложнее по мере перехода к бóльшим значениям Z. Все меньшими оказывались величины периодов полураспада их изотопов, все опаснее — работа с сильно радиоактивными препаратами, и все с меньшими количествами вещества приходилось исследователям иметь дело. Все трансурановые элементы до 101-го элемента включительно были синтезированы благодаря применению легких бомбардирующих частиц: *нейтронов,* дейтронов и альфа-частиц. В качестве мишеней использовались элементы с Z на 1 или на 2 меньше, чем у синтезируемого элемента. Так, в период с 1940 по 1955 г. таблица Менделеева пополнилась символами Np, Pu, Am (америций, названный в честь Америки), Cm (кюрий, в честь М. Склодовской-Кюри и П. Кюри), Bk (берклий, по названию университета в Беркли), Cf (калифорний, по названию Калифорнии), Es (эйнштейний, в честь А. Эйнштейна), Fm (фермий, в честь Э. Ферми) и Md (менделевий, в честь Д. И. Менделеева). Все эти элементы были синтезированы американскими учеными во главе с Г. Сиборгом.

За 15 лет — девять новых элементов, да притом не существующих в природе! Это был настоящий триумф экспериментальной и теоретической *ядерной физики.* Но дальше дело приостановилось, и виной тому были объективные обстоятельства. У элементов, порядковые номера которых стали измеряться трехзначными числами, величины периодов полураспада упали до секунд и долей секунд. Такие элементы уже невозможно накопить в количествах, достаточных для изготовления мишеней. Кроме того, по мере роста Z из-за электростатического отталкивания *протонов* все более резко возрастает неустойчивость трансурановых изотопов по отношению к спонтанному делению: этот вид радиоактивного распада оказывается главным врагом существования искусственных элементов с большими Z.

Преодолеть первое препятствие удалось сравнительно быстро. В качестве бомбардирующих частиц стали применять тяжелые многозарядные ионы: атомы бора, неона, азота, углерода, кислорода, аргона и других элементов сначала надо было лишить как можно большего числа *электронов* и образовавшиеся ионы затем разогнать до больших скоростей на мощных ускорителях. В роли мишеней использовали, например, уран и ближайшие к нему трансурановые элементы, которые вполне доступны. Вот по какой ядерной реакции был получен советским ученым Г. Н. Флеровым с сотрудниками курчатовий (Ku) — элемент с $Z = 104$: ${}^{242}_{94}Pu$ $({}^{22}_{10}Ne,\ 4n)$ ${}^{260}_{104}Ku$. В области синтеза элементов «второй сотни» уверенно лидировали советские физики из Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Несравненно бóльшие трудности возникли при изучении свойств синтезируемых изотопов этих элементов. Периоды их полураспада измеряются долями секунды (для изотопа ${}^{261}107$ $T_{1/2} \sim 0{,}003$ с), в результате ядерных реакций получаются буквально считанные атомы новых элементов, и нет никакой возможности накопить такие короткоживущие трансурановые элементы в сколь-либо заметных количествах. Для исследования свойств нобелия, лоуренсия, курчатовия, нильсбория, 106-го и 107-го элементов (они все еще не имеют названий) пришлось разработать принципиально новые экспериментальные методы.

Казалось, предел синтеза трансурановых элементов близок. Но в середине 60-х гг. теоретики предположили, что при некоторых больших значениях Z и N (число *нейтронов*), например при $Z = 114$ и 126, $N = 184$ и 196, весьма вероятно резкое возрастание стабильности ядер по отношению к спонтанному делению. Такой прогноз вселил в исследователей немалый оптимизм. Были сделаны попытки получить подобные «сверхэлементы» посредством ядерных реакций. Но эксперименты не привели к ожидаемым результатам. Точно так же не удалось обнаружить присутствие атомов гипотетических элементов с большими зарядами ядер в различных природных объектах. Вопрос пока остается открытым.

Рожденные гением человека, трансурановые элементы находят практическое применение главным образом как изотопные источники энергии. Особую роль играет плутоний-239, который является весьма эффективным ядерным горючим и служит одной из основ современной *ядерной энергетики.*

ТРЕНИЕ

Почему звучит скрипичная струна, когда по ней ведут смычком? Ведь смычок движется равномерно, а колебания струны периодические. А как разгоняется автомобиль и какая сила замедляет его при торможении? Почему автомобиль «заносит» на скользкой дороге? Ответы на все эти и многие другие важные вопросы, связанные с движением тел, дают законы трения.

В XVIII в. французский физик Кулон открыл закон, согласно которому сила трения $F_{тр}$ между *твердыми телами* не зависит от площади соприкосновения, а пропорциональна силе N, сдавливающей тела:

$$F_{тр} = kN.$$

Коэффициент трения k зависит только от свойств трущихся поверхностей и обычно лежит в пределах от 0,5 до 0,15. Хотя с тех пор было выдвинуто немало гипотез, объясняющих этот закон, до сих пор полной теории сил трения не существует. Трение определяется свойствами поверхности твердых тел, а они очень сложны и до конца еще не исследованы.

Поверхность твердого тела обычно обладает неровностями. Например, даже у очень хорошо отшлифованных *металлов* в электронный микроскоп видны «горы» и «впадины» размером в 100—1000 Å. При сжатии тел соприкосновение происходит только в самых высоких местах и площадь реального контакта значительно меньше общей площади соприкасающихся поверхностей. Давление в местах соприкосновения может быть очень большим, и там возникает пластическая деформация. При этом площадь контакта увеличивается, а давление падает. Так продолжается до тех пор, пока давление не достигнет определенного значения P_0,

Рис. 1. Силы трения, действующие на автомобиль при разгоне (*а*) и торможении (*б*). Зависимость силы сухого трения от скорости относительного движения (*в*).

Рис. 2. Отклонение скрипичной струны смычком.

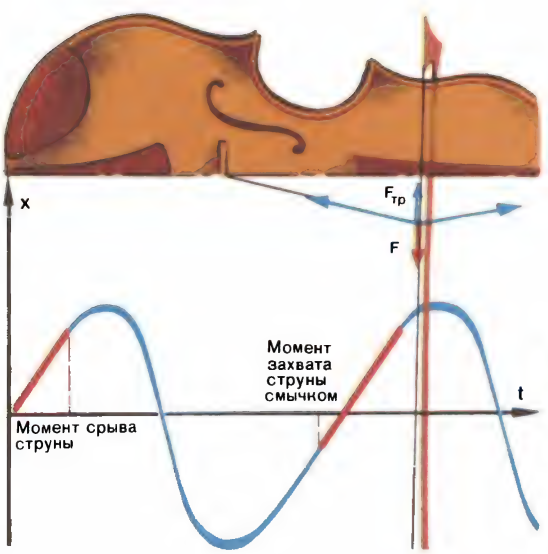
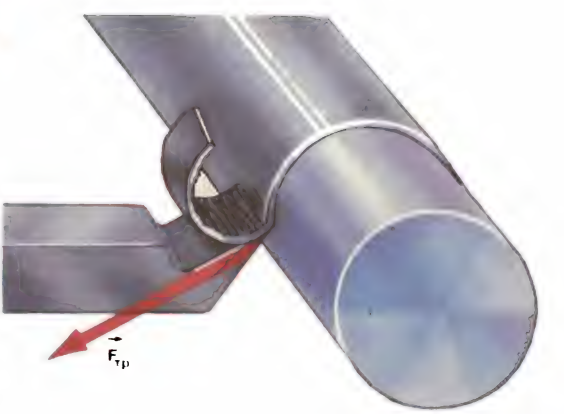


Рис. 3. Обработка металла резцом.



при котором деформация прекращается. Поэтому площадь фактического контакта S' оказывается пропорциональной сжимающей силе: $P_0S' = N$.

В месте контакта действуют силы молекулярного сцепления (известно, например, что очень чистые и гладкие металлические поверхности прилипают друг к другу). Таким образом, сила трения оказывается пропорциональной величине N, и коэффициент пропорциональности зависит от свойств поверхностей.

Эта модель сил сухого трения (так называют трение между твердыми телами), по-видимому, близка к реальной ситуации в *металлах*. Однако в других случаях картина менее ясна, и рассчитать теоретически, чему равен коэффициент трения, пока никому не удавалось.

Закон Кулона определяет максимальную величину силы трения. Если тело, например, просто лежит на горизонтальной поверхности, то сила трения на него не действует. Трение возникает, если попытаться сдвинуть тело, приложить к нему силу. Пока величина этой силы не превышает значения kN, тело остается в покое и сила трения равна по величине и обратна по направлению приложенной силе. Затем начнется движение. Таким образом, kN — это максимальная сила трения покоя.

Может показаться удивительным, но именно сила трения покоя разгоняет автомобиль. Ведь при движении автомобиля колеса не проскальзывают относительно дороги, и между шинами и поверхностью дороги возникает сила трения покоя. Как легко видеть (рис. 1,а), она направлена в сторону движения автомобиля. Величина этой силы не может превосходить значения $F_{тр}^{max} = kN$. Поэтому если на скользкой дороге резко нажать на газ, то автомобиль начнет буксовать. А вот если нажать на тормоза, то вращение колес прекратится и автомобиль будет скользить по дороге. Сила трения изменит свое направление (рис. 1,б) и начнет тормозить автомобиль.

Сила трения при скольжении твердых тел зависит не только от свойств поверхностей и силы *давления* (это зависимость качественно такая же, как для трения покоя), но и от скорости движения. Часто с увеличением скорости сила трения сначала резко падает, а затем снова начинает возрастать (рис. 1,в).

Эта важная особенность силы трения скольжения как раз и объясняет, почему звучит скрипичная струна. Вначале между смычком и струной нет проскальзывания, и струна захватывается смычком (рис. 2). Когда сила трения покоя достигнет максимального значения, струна сорвется, и дальше она колеблется почти как свободная, затем снова захватывается смычком и т. д.

Подобные, но уже вредные колебания могут возникнуть при обработке металла на токарном станке вследствие трения между снимаемой стружкой и резцом (рис. 3). И если смычок натирают канифолью, чтобы сделать зависимость силы трения от скорости более резкой, то при обработке металла приходится действовать наоборот (выбирать специальную форму резца, смазку и т. п.). Так что важно знать законы трения и уметь ими пользоваться.

Кроме сухого трения существует еще так называемое жидкое трение, возникающее при движении *твердых тел* в *жидкостях* и *газах* и связанное с их *вязкостью*. Силы жидкого трения пропорциональны скорости движения и обращаются в нуль, когда тело останавливается. Поэтому в жидкости можно заставить тело двигаться, прикладывая даже очень маленькую силу. Например, тяжелую баржу на воде человек может привести в движение, отталкиваясь от дна шестом, а на земле такой груз ему, конечно, не сдвинуть. Эта важная особенность сил жидкого трения объясняет, например, тот факт, почему автомобиль «заносит» на мокрой дороге. Трение становится жидким, и даже небольшие неровности дороги, создающие боковые силы, приводят к «заносу» автомобиля.

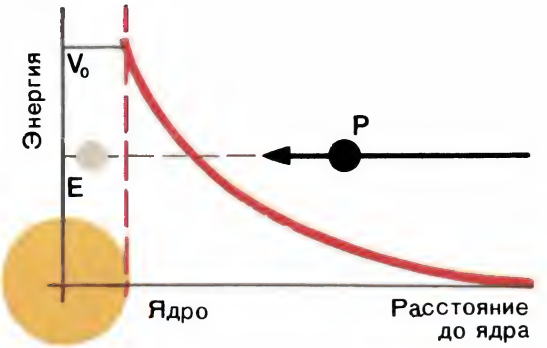
ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Может ли мяч пролететь сквозь стенку, да так, чтобы и стенка осталась стоять на месте неразрушенной, и энергия мяча при этом не изменилась? Конечно, нет, напрашивается ответ, в жизни такого не бывает. Для того чтобы пролететь сквозь стенку, мяч должен иметь достаточный запас энергии и проломить ее. Точно так же, если нужно, чтобы мяч, находящийся в ложбинке, перекатился через горку, необходимо сообщить ему запас энергии, достаточный для преодоления потенциального барьера — разности потенциальных энергий мяча на вершине и в ложбинке. Тела, движение которых описывается законами классической *механики*, преодолевают потенциальный барьер только тогда, когда они обладают полной энергией, большей, чем величина максимальной *потенциальной энергии*.

А как обстоит дело в микромире? Микрочастицы подчиняются законам *квантовой механики*. Они не двигаются по определенным траекториям, а «размазаны» в пространстве, подобно *волне*. Эти волновые свойства микрочастиц приводят к неожиданным явлениям, и среди них едва ли не самое удивительное — *туннельный эффект*.

Оказывается, что в микромире «стенка» может остаться на месте, а *электрон* как ни

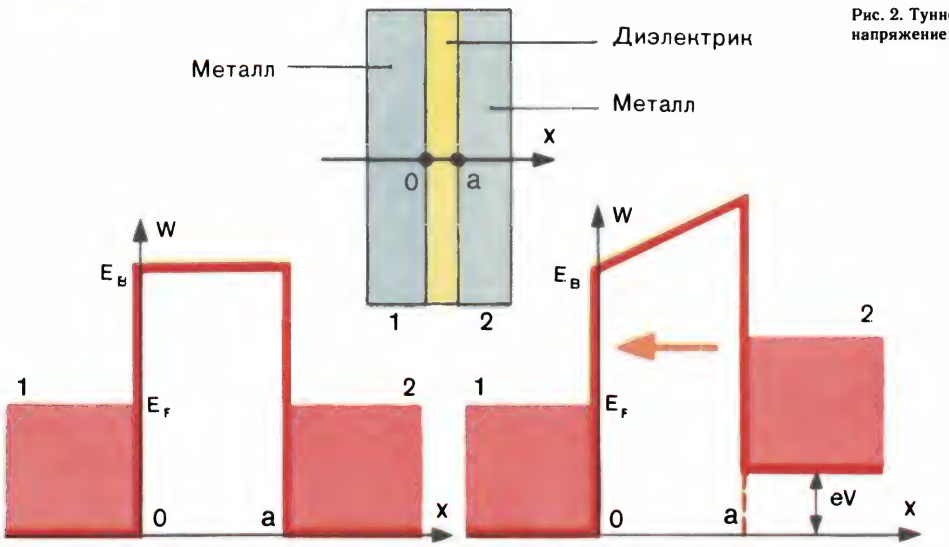
Рис. 1. Для того чтобы протон приблизился к ядру, необходимо затратить энергию.



ленная вероятность такого туннельного прохождения потенциального барьера. Эта вероятность тем больше, чем меньше разность энергии $U_0 - E$ и чем меньше масса частицы m (причем зависимость вероятности от величины $U_0 - E$ и m очень резкая — экспоненциальная).

Основываясь на идее туннелирования, Д. Кокрофт и Э. Уолтон в 1932 г. в Кавендишской лаборатории открыли искусственное расщепление ядер. Они построили первый ускоритель, и хотя энергия ускоренных протонов была недостаточна для преодоления потенциального барьера, все же протоны благодаря туннельному эффекту проникали в ядро и вызывали

Рис. 2. Туннельный контакт под напряжением.



в чем не бывало пролетает сквозь нее. Микрочастицы преодолевают потенциальный барьер, даже если их энергия меньше, чем его высота.

Потенциальный барьер в микромире часто создают электрические силы, и впервые с этим явлением столкнулись при облучении *атомных ядер* заряженными частицами. Положительно заряженной частице, например *протону*, невыгодно приближаться к ядру, так как, по закону Кулона, между протоном и ядром действуют силы отталкивания. Поэтому для того, чтобы приблизить протон к ядру, надо совершить работу; график потенциальной энергии имеет вид, показанный на рис. 1. Правда, достаточно протону вплотную подойти к ядру (на расстоянии $\sim 10^{-12}$ см), как тут же вступают в действие мощные ядерные силы притяжения (*сильное взаимодействие*) и он захватывается ядром. Но ведь надо сначала подойти, преодолеть потенциальный барьер.

И вот оказалось, что протон это делать умеет, даже когда его энергия E меньше высоты барьера U_0. Как всегда в квантовой механике, при этом нельзя сказать с достоверностью, что протон проникнет в ядро. Но имеется определенная вероятность такого туннельного прохождения потенциального барьера. Эта вероятность тем больше, чем меньше разность энергии $U_0 - E$ и чем меньше масса частицы m (причем зависимость вероятности от величины $U_0 - E$ и m очень резкая — экспоненциальная).

Основываясь на идее туннелирования, Д. Кокрофт и Э. Уолтон в 1932 г. в Кавендишской лаборатории открыли искусственное расщепление ядер. Они построили первый ускоритель, и хотя энергия ускоренных протонов была недостаточна для преодоления потенциального барьера, все же протоны благодаря туннельному эффекту проникали в ядро и вызывали *ядерную реакцию*. Туннельный эффект также объяснил явление *альфа-распада*.

Туннельный эффект нашел важное применение в физике *твердого тела* и в электронике.

Представьте себе, что на стеклянную пластинку (подложку) нанесли пленку металла (обычно ее получают, напыляя металл в *вакууме*). Затем ее окислили, создав на поверхности слой *диэлектрика* (окисла) толщиной всего в несколько десятков ангстрем. И снова покрыли пленкой металла. В результате получится так называемый «сэндвич» (в буквальном смысле этим английским словом называют два куска хлеба, например, с сыром между ними), или, иначе говоря, туннельный контакт.

Могут ли электроны переходить из одной металлической пленки в другую? Казалось бы, нет — им мешает слой диэлектрика. На рис. 2 приведен график зависимости потенциальной энергии электрона от координаты. В *металле электрон* движется свободно, и его потенциальная энергия равна нулю. Для выхода в *диэлектрик* надо совершить работу выхода $W_в$, которая больше, чем кинетическая (а следо-

вательно, и полная) энергия электрона $W_э$. Поэтому электроны в металлических пленках разделяет потенциальный барьер, высота которого равна $W_в - W_э$.

Если бы электроны подчинялись законам классической *механики*, то такой барьер для них был бы непреодолим. Но вследствие туннельного эффекта с некоторой вероятностью электроны могут проникать через диэлектрик из одной металлической пленки в другую. Поэтому тонкая пленка диэлектрика оказывается проницаемой для электронов — через нее может течь так называемый туннельный ток. Однако суммарный туннельный ток равен нулю: сколько электронов переходит из нижней металлической пленки в верхнюю, столько же в среднем переходит, наоборот, из верхней пленки в нижнюю.

Как же сделать туннельный ток отличным от нуля? Для этого надо нарушить симметрию, например подсоединить металлические пленки к источнику с напряжением U. Тогда пленки будут играть роль обкладок конденсатора, а в слое диэлектрика возникнет электрическое поле. В этом случае электронам из верхней пленки преодолеть барьер легче, чем электронам из нижней пленки. В результате даже при малых напряжениях источника возникает туннельный ток. Туннельные контакты позволяют исследовать свойства электронов в металлах, а также используются в электронике.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентность — явление, наблюдаемое во многих течениях *жидкостей* и *газов* и заключающееся в том, что в этих течениях образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего их гидродинамические и термодинамические характеристики (скорость, давление, температура, плотность) испытывают хаотические *флуктуации* и поэтому изменяются в пространстве и времени нерегулярно.

Течение жидкости, в котором наблюдается турбулентность, называется турбулентным. При таком течении частицы жидкости и газа совершают неупорядоченные, неустановившиеся движения, что приводит к их интенсивному перемешиванию.

Этим турбулентные течения отличаются от так называемых ламинарных течений, имеющих регулярный характер и способных меняться во времени лишь с изменением действующих сил или внешних условий. При ламинарном течении частицы жидкости или газа перемещаются строго в одном направлении слоями, которые не смешиваются между собой.

Благодаря большой интенсивности хаотического перемешивания турбулентные течения обладают повышенной способностью к передаче тепла, ускоренному распространению химических реакций (например, горения), рассе-

ДЫМОВЫЕ КОЛЬЦА

Явление турбулентности можно продемонстрировать на вихревых кольцах. Опыт делается следующим образом.

Берут деревянный ящик, одну его стенку снимают, а на противоположной вырезают круглое отверстие диаметром 10 ÷ 20 см. Снятую стенку заменяют мембраной — натянутой плотной материей, пластиковой пленкой и т. п. Если теперь резко ударить ладонью по мембране, то воздух из ящика выбрасывается в виде вращающегося кольца. Чтобы сделать кольцо видимым, внутрь ящика ставят два блюдца. Одно — с соляной кислотой, другое — с нашатырным спиртом. Жидкости следует немного подогреть. Ящик наполняется белым дымом хлористого аммония, и вихревые кольца становятся хорошо видимыми. Опыт надо проводить в большой, хорошо проветриваемой комнате и только под руководством преподавателя.

Демонстрировать эксперимент с кольцами любил известный американский физик Роберт Вуд. Вот как он писал в своей статье: «Наше устройство значительно больше тех, что обычно используются. Это кубический деревянный ящик со стороной около метра; одна из стенок сделана из тонкой пленки, свободно подвешенной, с двумя диагоналями из резиновых трубок, крепко привязанных по углам. Резиновые трубки нужны для того, чтобы обеспечить возвращение пленки в первоначальное положение. Такой ящик выбрасывает воздушные вихри большой силы, причем удар кольца о стену лекционного зала отчетливо слышен и похож на звук от легкого удара полотенцем. Аудитория может получить представление о «твердости» вращающегося воздушного вихря, если последовательно выпускать невидимые кольца в зал.

Ударом кольца можно погасить пламя газовой горелки...»

Р. Вуд выпускал несколько колец подряд так, что они догоняли и ударялись друг о друга, использовав ящик с несколькими дырками, и т. п.

Если вы изготовите аппарат для получения колец (он носит название аппарата Тэта), то сможете самостоятельно изучить поведение вихрей в самых разнообразных ситуациях.

иванию звуковых и *электромагнитных волн*, а также к передаче *импульса* и вследствие этого к повышенному силовому воздействию на обтекаемые ими *твердые тела*. При этом в турбулентных течениях движущиеся тела испытывают значительно большее сопротивление, что приводит к значительным потерям энергии.

Турбулентность возникает при определенных условиях как следствие гидродинамической неустойчивости ламинарных течений. Ламинарное течение теряет устойчивость и превращается в турбулентное, когда отношение сил *инерции* к силам *вязкости*, так называемое число Рейнольдса (Re), превзойдет некоторое критическое значение, характерное для определенных конкретных условий.

Английский физик О. Рейнольдс (1842—1912) следующим образом объяснял своим ученикам физический смысл открытого им критерия:

«Жидкость можно уподобить отряду воинов, ламинарное течение — монолитному походному строю, турбулентное — беспорядочному движению. Скорость жидкости и диаметр трубы — это скорость и величина отряда, вязкость — дисциплина, а плотность — вооружение. Чем больше отряд, чем быстрее его движение и тяжелее вооружение, тем раньше распадается строй. Таким же образом турбулентность возникает в жидкости тем быстрее, чем выше ее плотность, чем меньше вязкость и больше скорость жидкости и диаметр трубы».

Наиболее детально изучены турбулентные течения в трубах, каналах, пограничных слоях, около обтекаемых жидкостью или газом твердых тел и так называемые свободные турбулентные течения — струи, следы за движущимися относительно жидкости или газа твердыми телами и зоны перемешивания между потоками разных скоростей, не разделенными какими-либо твердыми стенками, и т. д., а также явление турбулентности *атмосферы*.

Турбулентность атмосферы играет большую роль во многих атмосферных явлениях и процессах — обмене энергией между атмосферой и поверхностью, переносе тепла и влаги, испарений с земной поверхности и водоемов, *диффузии* атмосферных загрязнений, зарождении ветровых волн и ветровых течений в море, рассеянии коротких радиоволн в атмосфере и т. п.

В отличие от турбулентности в искусственных каналах (трубах, струях, пограничных слоях и др.) турбулентность атмосферы имеет специфические особенности: спектр масштабов турбулентных движений в атмосфере весьма широк — от нескольких миллиметров до тысяч километров, турбулентность атмосферы развивается в пространстве, ограниченном одной «стенкой» — поверхностью Земли.

Большой практический интерес представляет вопрос о потерях энергии при движении *твердого тела* в *жидкостях* и *газе*. Дело в том, что при малых скоростях сопротивление движению увеличивается пропорционально скорости. При этом, как показали исследования в аэродинамической трубе, движущийся поток сохраняет ламинарность. При дальнейшем увеличении скорости в какой-то момент начинают образовываться турбулентные завихрения. С этого момента сопротивление возрастает пропорционально квадрату скорости, т. е. большая часть энергии расходуется на образование вихрей в пограничном слое и позади движущегося тела. Поэтому даже незначительный прирост скорости требует больших затрат энергии.

Было замечено, что не подчиняются этой закономерности водные представители животного мира — дельфины. Известно, что они развивают скорость до 50 км/ч и легко поддерживают ее в течение нескольких часов. Если считать, что движение дельфина в воде аналогично движению любого твердого тела, то расчеты показывают, что для этого дельфину не хватит его мускульных сил (парадокс Грея).

Исследование дельфинов в гидродинамической трубе показали, что во время движения поток жидкости, обтекающий тело дельфина, остается ламинарным. Наблюдения за движениями дельфинов в океанариуме привели к следующим результатам: при движении в воде по толстой упругой коже дельфина пробегают складки. Они возникают при критических режимах обтекания, когда скорость возрастает настолько, что поток вот-вот может из ламинарного превратиться в турбулентный. Тут-то на коже и возникает как бы «бегущая волна», которая гасит образующиеся завихрения, помогая поддерживать постоянное ламинарное обтекание.

Как только тайна скорости дельфинов оказалась раскрытой, инженеры стали искать возможности ее использования. Изготовили «дельфинью» обшивку для стальной торпеды. Она состояла из нескольких слоев резины, пространство между которыми заполнили силиконовой жидкостью, перетекающей по узким трубочкам из одного межслойного промежутка в другой. Конечно, это было только грубое приближение, но и оно позволило уменьшить сопротивление движению на 60% (при движении торпеды со скоростью 70 км/ч).

Мягкие оболочки нашли применение не только в судостроении. Представьте себе тысячи километров нефтепроводов. Мощные насосные станции гонят по ним нефть. Энергия этих станций тратится и на преодоление завихрений, турбулентных потоков, возникающих в трубах. Если же трубы изнутри покрыть эластичной оболочкой, сопротивление уменьшится за счет ламинаризации потока нефти, а следовательно, в результате сократится расход электроэнергии.

ТЯГОТЕНИЕ

У истоков физики стоял Г. Галилей. До него вместо науки были умозрительные рассуждения, неколебимая вера в авторитет Аристотеля — древнегреческого ученого IV в. до н. э., отдельные наблюдения. Не было главного — единого метода, общего подхода к исследованию природы. Галилей впервые провозгласил опыт главным источником познания, утвердил эксперимент в качестве основного критерия истинности любой научной теории.

Галилей открыл законы свободного падения тел, опровергнув аристотелевское учение о свободном падении. Аристотель считал, что при падении тяжелые тела движутся со скоростью, пропорциональной их весу. Видимо, он пришел к такому заключению на основе наблюдений: ведь, действительно, лист бумаги медленно опускается на Землю, а камень летит прямо вниз.

Аристотель ошибся, так как не учел сопротивления воздуха. А Галилей доказал: все тела у поверхности Земли в пустоте приобретают одно и то же ускорение.

Такой же вывод сделал при анализе своих экспериментов и И. Ньютон. Он установил, использовав для опыта определенный набор веществ, что золото, свинец, стекло, песок, соль, вода, дерево, пшеница в безвоздушном пространстве движутся с одним и тем же ускорением.

Сегодня мы говорим об этом замечательном свойстве *тяготения* (гравитации) как о равенстве инертной и тяжелой *масс*; факт этого равенства положен в основу общей *теории относительности*. В настоящее время равенство инертной и тяжелой масс экспериментально проверено с относительной точностью 10^{-12}

Ньютон предположил, что все без исключения тела во Вселенной заставляет притягиваться друг к другу одна единая по природе сила. Он поставил целью открыть закон, по которому действует эта сила всемирного тяготения. Сделать это было не просто, поскольку очень многое было еще неизвестно науке того времени. Установив, что все тела приобретают на поверхности Земли одно и то же ускорение, Ньютон не мог знать о том, что это ускорение меняется при удалении от поверхности Земли (тогда подобные эксперименты не могли быть проведены). Он не знал также, что различные предметы на Земле тоже притягиваются друг к другу (эксперименты, доказывающие это, были выполнены более чем через 100 лет). Однако Ньютону были известны эмпирически выведенные в начале XVII в. немецким астрономом И. Кеплером законы движения планет, из которых следовал вывод, что сила тяготения должна зависеть от расстояния между телами.

Открытый Ньютоном закон всемирного тяготения гласит, что две любые материальные частицы с массами m_1 и m_2 притягиваются по направлению друг к другу с силой F, прямо пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

(здесь G — гравитационная постоянная, равная, по современным данным, $6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$).

На основе закона всемирного тяготения Ньютон дал математический вывод известных законов Кеплера о движении планет, объяснил природу морских приливов и многие другие явления.

Ньютон настолько опередил свой век, что многие высказанные им предположения находят научное объяснение лишь в наше время.

Наука продолжает исследования природы тяготения.

Установлено, что тяготение — самое универсальное и наислабейшее из фундаментальных взаимодействий (см. *Единство сил природы*). Закон всемирного тяготения управляет движением галактик так же, как искусственных спутников.

Известно, что свет теряет или приобретает энергию, пролетая через гравитационное поле (поле тяготения), и что свет искривляет свой путь в гравитационном поле.

Ученые уверены, что тяготение очень тесно связано с фундаментальным свойством вещества — *инерцией* — и что оно управляет законами эволюции Вселенной. На основе общей теории относительности вносятся поправки к закону Ньютона.

Ученые предполагают, что гравитация может быть причиной появления таких удивительных объектов, как «черные дыры».

Итак, хотя о тяготении уже много известно, необходимо дальнейшее его изучение.

У, Ф, Ц, Ч

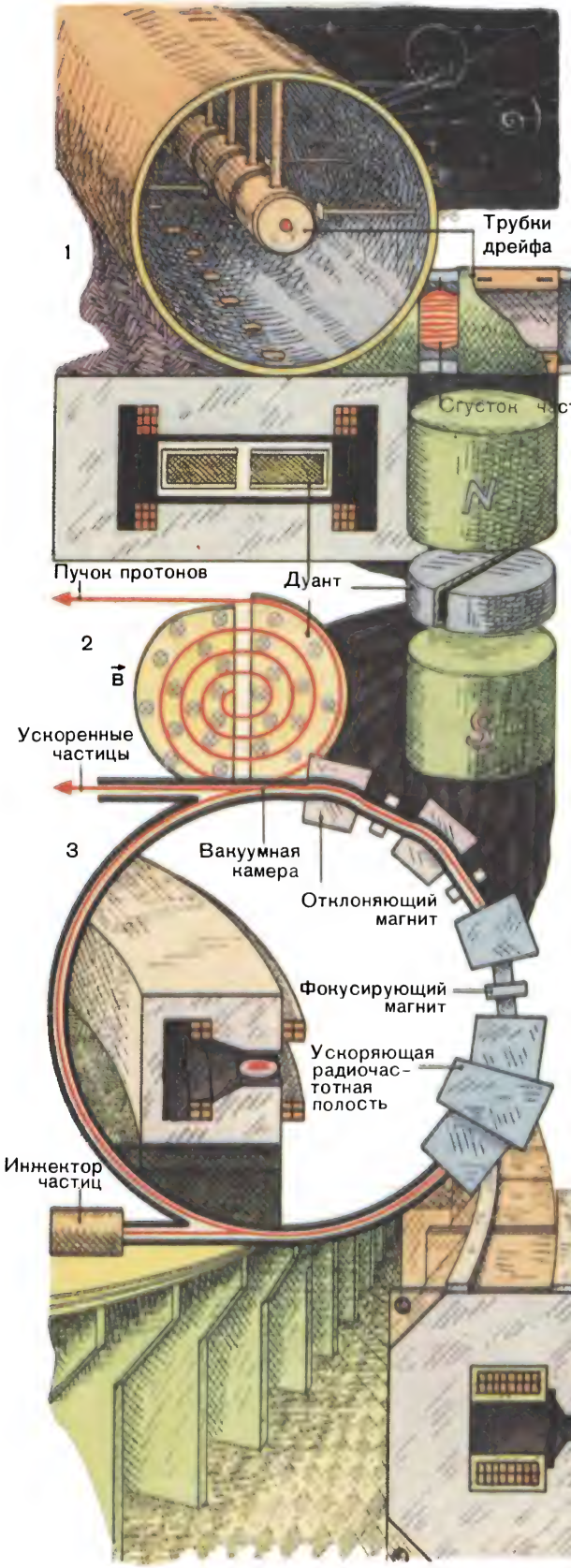
УДАРНАЯ ВОЛНА

При движении тела в среде со сверхзвуковой скоростью возникает так называемая *ударная волна*. Она сопровождает, например, полеты сверхзвуковых самолетов, взрывы, мощные электрические разряды. Ее возникновение и суть можно разобрать на примере самолета. В полете самолет затормаживает набегающий поток воздуха, сообщая ему импульс давления. Распространяется этот импульс, как и любое механическое возмущение, со скоростью *звука*. Поэтому, если скорость у самолета дозвуковая, процесс торможения и уплотнения воздуха растянут во времени. Импульс давления обгоняет самолет, как бы предупреждая о приближении летящего тела, и торможение, уплотнение воздуха происходит постепенно. При полете со сверхзвуковой скоростью ни импульс давления, ни звуковые волны от работающего двигателя и рассекаемого воздуха, разумеется, не могут опередить самолет. В этом случае торможение набегающего воздуха происходит мгновенно, словно удар о стену. Плотность воздуха резко, скачком возрастает. В результате возникает ударная волна — распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью очень тонкая (толщина равна свободному пробегу *молекул* воздуха) переходная область, в которой мгновенно возрастают плотность, давление и скорость вещества. Ударные волны на специальных фотографиях, снятых в сверхзвуковой аэродинамической трубе, напоминают волны на поверхности воды, расходящиеся от носа корабля.

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Чтобы проникнуть в тайны микромира, человек изобрел микроскоп. Со временем выяснилось, что возможности оптических микроскопов весьма ограничены — они не позволяют «заглянуть» в глубь атомов. Для этих целей более подходящими оказались не световые лучи, а пучки заряженных частиц. Так, в знаменитых опытах Э. Резерфорда использовался поток α-частиц, испускаемых радиоактивными препаратами (см. *Атом*). Однако природные источники частиц (радиоактивные вещества) дают пучки очень малой интенсивности, энергия частиц оказывается относительно невысокой, к тому же эти источники неуправляемы. Поэтому возникла проблема создания искусственных источников ускоренных заряженных час-

Ударная волна сопровождает полеты сверхзвуковых самолетов.



Ускорители заряженных частиц: *1* — линейный ускоритель; *2* — циклотрон; *3* — синхротрон; *4* — Серпуховский синхрофазотрон.

тиц. К ним относятся, в частности, электронные микроскопы, в которых используются пучки электронов с энергиями порядка 10^5 эВ.

В начале 30-х гг. нашего столетия появились первые ускорители заряженных частиц. В этих установках заряженные частицы (*электроны* или *протоны*), двигаясь в вакууме под действием электрических и магнитных полей, приобретают большой запас энергии (ускоряются). Чем больше энергия частицы, тем меньше ее длина волны (см. *Квантовая механика*) и тем, следовательно, в большей степени подходят такие частицы для «прощупывания» микрообъектов. В то же время с возрастанием энергии частицы раширяется число вызываемых ею взаимопревращений частиц, приводящих, в частности, к рождению новых элементарных частиц. Следует, однако, иметь в виду, что проникновение в мир *атомов* и *элементарных частиц* обходится недешево. Чем выше конечная энергия ускоряемых частиц, тем более сложными и крупными оказываются ускорители; их размеры могут достигать нескольких километров. Существующие ускорители позволяют получать пучки заряженных частиц с энергиями от нескольких МэВ до сотен ГэВ (1 МэВ = 10^6 эВ, 1 ГэВ = 10^9 эВ, 1 ТэВ = = 10^{12} эВ). Интенсивность пучков частиц достигает 10^{15} — 10^{16} частиц в секунду; при этом пучок может быть сфокусирован на мишени площадью всего несколько квадратных миллиметров. В качестве ускоряемых частиц чаще всего используются протоны и электроны.

Наиболее мощные и дорогостоящие ускорители строятся с чисто научными целями — чтобы получать и исследовать новые частицы, изучать взаимопревращения частиц. В насто-

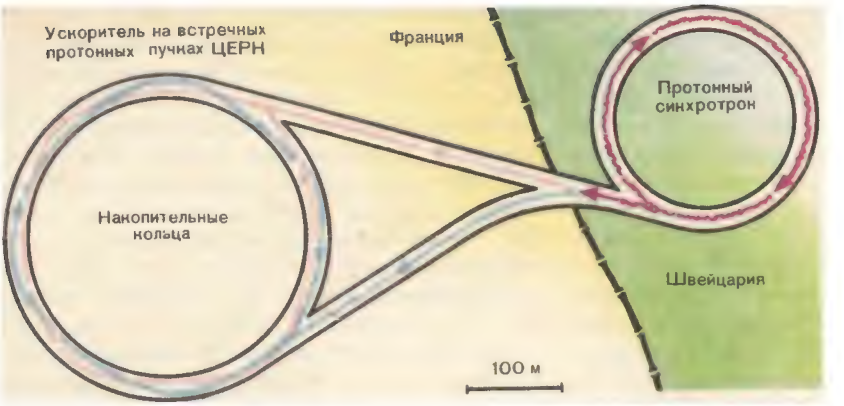


Схема ускорителя на встречных протонных пучках ЦЕРН (Швейцария — Франция).

ящее время известно несколько сотен типов частиц и столько же античастиц (см. *Элементарные частицы*); почти все они открыты при помощи ускорителей. Ускорители относительно невысоких энергий широко применяются в медицине и технике — для лечения раковых больных, для производства радиоактивных *изотопов*, для улучшения свойств полимерных материалов и для многих других целей.

Многообразие существующих типов ускорителей можно разбить на четыре группы: ускорители прямого действия, линейные ускорители, циклические ускорители, ускорители на встречных пучках.

В ускорителях прямого действия частицы разгоняются в постоянном электрическом поле. Пусть U — разность потенциалов между двумя электродами. Пролетев расстояние, разделяющее эти электроды, частица с зарядом e приобретает энергию eU. В данном случае не удается достичь энергий выше примерно 10 МэВ, поскольку при дальнейшем повышении напряжения между электродами возникает электрический пробой. Для достижения более высоких энергий идут по иному пути: на ускоряемую частицу воздействуют не слишком сильными электрическими полями, но зато воздействуют многократно.

Используя рисунок, рассмотрим принцип действия линейного ускорителя. Частицы движутся по прямой, последовательно проходя сквозь систему трубчатых электродов (их называют трубками дрейфа), на которые подается переменное напряжение. Внутри трубок поля нет, там частица движется равномерно. Частица ускоряется всякий раз, когда оказывается в промежутке между соседними трубками дрейфа (его называют ускоряющим промежутком). Для этого надо, чтобы время пролета частицы от одного промежутка к другому равнялось половине периода ускоряющего поля. Если T — указанный период, то длина n-й трубки должна быть равна $l_n = v_n T/2$, где v_n — скорость частицы в трубке. В ситуации, показанной на рисунке, положительно заряженная частица будет ускоряться в промежутках I и III и, напротив, замедляться в промежутках II и IV. В рассматриваемый момент времени группы (сгустки) ускоряемых частиц должны находиться в промежутках I и III. При правильно подобранных длинах трубок сгустки частиц через время $T/2$ переместятся соответственно в промежутки II и IV. Но за это время знак поля изменится и указанные промежутки станут ускоряющими.

Для сокращения длины ускорителя трубки дрейфа необходимо иметь как можно более короткие, для чего следует увеличивать частоту f ускоряющего поля. Например, при $f = 1$ МГц длина трубки, сквозь которую летят протоны с энергией 10 МэВ, должна равняться 20 м, а при $f = 10$ МГц — 2 м. Все эти длины слишком велики. Поэтому в протонных ускорителях используют $f = 200$—300 МГц, а в электронных и того больше. При столь высоких частотах управление фазой ускоряющего поля осуществляют уже не с помощью проводов (как это было показано на рисунке), а при помощи объемных резонаторов, в которых реализуются сверхвысокочастотные электромагнитные колебания. Резонатор линейного ускорителя представляет собой длинную трубу, внутри которой находится цепочка трубок дрейфа.

Существующие линейные ускорители электронов позволяют ускорять электроны до энергии 1—10 ГэВ. В ускорителе в Станфорде (США) достигнута энергия 20 ГэВ. Длина ускорителя более 3 км.

В циклических ускорителях частицы движутся по траекториям, свернутым в спираль или кольцо, многократно возвращаясь к одним и тем же ускоряющим узлам. Для искривления траектории частицы применяют магнитное поле. Рассмотрим принцип действия одного из типов циклических ускорителей — циклотрона. В зазор между полюсами электромагнита помещают вакуумную камеру, внутри которой находятся электроды, напоминающие по форме половинки консервной банки (так называемые дуанты). Пока частица движется внутри дуанта, модуль ее скорости постоянен (траектория частицы — полуокружность). Когда частица проходит промежуток

между дуантами, она испытывает действие электрического поля и ускоряется. Поэтому в другой дуант частица попадает, имея уже более высокую скорость, и описывает в этом дуанте траекторию в виде полуокружности большего радиуса. Независимо от радиуса траектории время пребывания частицы внутри дуанта одно и то же, оно равно $\pi m/eB$, где B — магнитная индукция, e и m — заряд и масса частицы. Если период изменения высокочастотного напряжения, подаваемого на дуанты, подобрать равным $2\pi m/eB$, то частица, попадая в промежуток между дуантами, будет всякий раз ускоряться. Частицы непрерывно вводят в камеру циклотрона вблизи от ее центра. Постепенно приобретая энергию, они движутся по траектории, напоминающей раскручивающуюся спираль, и в конечном счете покидают циклотрон. Циклотроны применяют для ускорения протонов и ионов. Они позволяют достичь энергий, равных нескольким десяткам МэВ. Стремление получить более высокие энергии наталкивается на ряд трудностей. С увеличением энергии начинает проявляться зависимость массы частицы от ее скорости (см. *Относительности теория*), вследствие чего изменяется период обращения частицы в камере ускорителя. С ростом энергии увеличивается радиус траектории частицы в данном магнитном поле, и, значит, нужно увеличивать площадь полюсов электромагнита.

Стремясь справиться с этими и другими трудностями, ученые создали различные типы импульсных циклических ускорителей, в которых в процессе ускорения меняются частота ускоряющего напряжения или величина магнитного поля. Как установили советский физик В. И. Векслер и американский ученый Э. Макмиллан, движение частиц в таких ускорителях при определенных условиях автоматически подстраивается так, что частицы все время будут находиться в фазе с ускоряющим полем. Это так называемый принцип автофазировки, благодаря которому становится возможным ускорять частицы до релятивистских энергий. Так, фазотроны, предназначенные для ускорения тяжелых частиц (*протонов* и ионов) до энергий ~ 1 ГэВ, напоминают циклотроны, но отличаются от последних тем, что у них частота ускоряющего поля не постоянна, а постепенно уменьшается по мере ускорения данного сгустка частиц и затем возрастает при захвате следующего сгустка. В синхротроне — ускорителе, предназначенном для ускорения *электронов*,— полюса электромагнита образуют кольцо, а вакуумная камера имеет форму полой баранки. Траектория частиц в синхротроне неизменна — это окружность, проходящая посредине вакуумной камеры. По мере ускорения сгустка частиц магнитное поле на «кольцевой дорожке» синхротрона соответствующим образом возрастает.

ВЛАДИМИР ИОСИФОВИЧ ВЕКСЛЕР (1907 — 1966)

Советский физик, академик, лауреат Ленинской и Государственной премий.

Родился в Житомире. В 1931 г. окончил Московский энергетический институт. С 1936 г. начал работать в Физическом институте Академии наук СССР.

В. И. Векслер внес большой вклад в организацию (1956) и развитие Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Наибольшую известность принесли В. И. Векслеру его работы по теории *ускорителей заряженных частиц*, ознаменовавшие поворотный пункт в развитии техники ускорителей. В 1944 г. он предложил новый принцип автофазировки частиц — явления, которое обеспечивает ускорение электронов, протонов, альфа-частиц (см. *Альфа-распад*), многозарядных ионов до высоких энергий (от нескольких МэВ до сотен ГэВ). Принцип автофазировки позволил поднять предел доступных энергий частиц в тысячи раз.

На этом принципе основана работа новых типов ускорителей — синхротрона, фазотрона и микротрона. Под руководством В. И. Векслера были созданы первые в нашей стране синхротрон (1947) и синхрофазотрон (1957) в Дубне.

В 1956—1966 гг. Векслер разработал основы так называемого коллективного метода ускорения. В настоящее время ускорители приобрели важнейшее значение в физике частиц высоких энергий, занимающейся исследованиями *атомного* ядра.

В. И. Векслеру принадлежат также работы по физике *рентгеновских лучей* и космической радиации (см. *Космические лучи*).

Он был организатором (1965) и главным редактором журнала «Ядерная физика».

В. И. Векслер создал школу специалистов в области ускорительной физики и техники. Он всегда подчеркивал, что атом должен служить только мирным целям. В 1963 г. ему была присуждена международная премия «Атом для мира».

Так как скорость электронов очень быстро становится близкой к скорости света, частота их обращения по орбите синхротрона не меняется с ростом энергии. Поэтому в синхротроне частота ускоряющего электрического поля — постоянная величина. У крупных синхротронов, ускоряющих электроны до энергий ~ 10 ГэВ, длина кольцевой траектории достигает километров. Кольцевой электромагнит состоит из тысяч отдельных блоков. За цикл ускорения частица совершает в синхротроне сотни тысяч оборотов.

Для ускорения тяжелых частиц до очень высоких энергий используют синхрофазотроны — кольцевые ускорители, у которых в процессе ускорения в строгом соответствии друг с другом меняются одновременно и величина магнитного поля, и частота ускоряющего напряжения, так что радиус орбиты частиц остается постоянным при росте их энергии. Специальная конфигурация магнитного поля не позволяет частицам отклониться далеко от этой орбиты (так называемая жесткая фокусировка), и поэтому ширина магнитной дорожки может быть небольшой. Синхрофазотрон в Серпухове позволяет реализовать энергию протонов 76 ГэВ. Длина его кольцевой вакуумной камеры, находящейся в магнитном поле, составляет 1,5 км; в поперечном сечении камера имеет форму эллипса с осями 17 и 11,5 см. Существуют синхрофазотроны и с еще большей энергией — до $400 \div 500$ ГэВ. В настоящее время сооружаются и проектируются огромные ускорители нового поколения, в которых уже должны быть использованы сверхпроводящие магнитные поля. Энергия ускоренных частиц в этих «суперсинхрофазотронах» превысит 1 ТэВ.

В заключение расскажем об ускорителях на встречных пучках. В обычных ускорителях пучок ускоренных частиц направляют на неподвижную мишень. При этом характер взаимодействия частиц пучка с частицами мишени определяется лишь малой частью энергии ускоренных частиц, основная же часть этой энергии переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. В связи с этим родилась идея использовать встречные пучки ускоренных частиц. Например, два встречных протонных пучка от Серпуховского ускорителя на 76 ГэВ могли бы дать такой же эффект, какой можно было бы ожидать от протонного пучка с энергией 12 000 ГэВ в случае неподвижной водородосодержащей мишени. Основной недостаток ускорителей на встречных пучках — низкая плотность частиц в пучке по сравнению с плотностью частиц в неподвижной (например, твердой) мишени. Чтобы увеличить плотность частиц в пучке, применяют так называемые накопительные кольца, где ускоренные частицы накапливаются за счет многих циклов ускорения. Кроме того, принимаются

ГЕРШ ИЦКОВИЧ БУДКЕР (1918 — 1977)

Советский физик, академик, лауреат Ленинской и Государственной премий

Г. И. Будкер родился в селе Мурафа Винницкой области. Окончив среднюю школу в Виннице, в 1936 г. поступил на физический факультет Московского университета. Когда началась Великая Отечественная война, он ушел добровольцем в действующую армию.

В 1945—1957 гг. Г. И. Будкер работал в Институте атомной энергии АН СССР в Москве. С 1957 г. он возглавлял организованный при его участии в Новосибирске Институт ядерной физики Сибирского отделения Академии наук.

Основные труды Будкера посвящены теории атомных реакторов, *ускорителей заряженных частиц,* физике *плазмы* и проблеме *термоядерного синтеза,* физике высоких энергий.

Г. И. Будкер является автором целого ряда принципиально новых предложений в различных областях физики. Так, разработанный им метод удержания плазмы с помощью «магнитных пробок» положен в основу многих термоядерных установок.

Он предсказал возможность устойчивого существования «стабилизированного электронного пучка» (замкнутых колец из релятивистских электронов). В новом поколении ускорителей используются разработанные Будкером накопительные кольца с встречными пучками электронов-позитронов, протонов-антипротонов и т. д., и это значительно увеличивает энергию столкновений частиц.

Предложенный Будкером метод «электронного охлаждения» в ускорителях заряженных частиц позволяет сжимать, «охлаждать» протонные и антипротонные пучки, в результате чего усиливается эффективность их столкновений в накопителях.

Многие разработанные им научные идеи были под его руководством успешно осуществлены в Институте ядерной физики в Новосибирске. Введены в действие ускорители на встречных электрон-электронных и электрон-позитронных пучках и развернуты физические эксперименты на них; экспериментально продемонстрировано «электронное охлаждение».

меры к фокусировке пучков с тем, чтобы максимально сжать пучки в месте их взаимной встречи. В настоящее время во всем мире существуют более десятка ускорителей со встречными e^+e^--пучками с энергией каждого пучка вплоть до 18 ГэВ. В СССР в Новосибирске работают два таких ускорителя с пучками по 700 МэВ и по 7 ГэВ. В Европе (ЦЕРН, Швейцария — Франция) работают ускорители со встречными протонными пучками по 30 ГэВ и с протон-антипротонными пучками по 270 ГэВ. Именно на последнем ускорителе недавно были открыты новые очень тяжелые частицы (их масса составляет 10^2 протонных масс) — так называемые промежуточные бозоны. Сейчас планируется создание новых ускорителей со встречными протонными (или протон-антипротонными) пучками с энергией до нескольких ТэВ и со встречными e^+e^--пучками с энергией до 150 ГэВ.

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Переходы вещества из одной фазы в другую при изменении состояния системы называют фазовыми превращениями. Фаза — совокупность телесных объектов, имеющих определенный химический состав и термодинамические свойства, отделенная от других фаз поверхностью раздела. Или иначе: фаза — это однородная часть неоднородной системы, которая может быть выделена из системы каким-либо механическим способом. Существует, как правило, одна газовая фаза (за исключением редких случаев расслоения газовых смесей при очень высоких давлениях). Число жидких и особенно твердых фаз может быть достаточно велико.

Основная характеристика фазовых превращений — температура, при которой фазы находятся в состоянии термодинамического равновесия,— точка фазового перехода. В 1933 г. профессор Лейденского университета в Нидерландах П. Эренфест предложил классификацию фазовых переходов. Согласно этой классификации, для фазовых переходов первого рода характерно, что в точке фазового перехода наблюдается выделение или поглощение тепла (q) и изменение объема (Δv). К фазовым переходам первого рода относятся, например, превращение твердого тела в жидкое (*плавление*) и обратный процесс (кристаллизация), жидкого — в пар (*испарение, кипение*), одной кристаллической модификации — в другую (полиморфные превращения) и др. При фазовых переходах второго рода тепловой и объемный эффекты отсутствуют, зато в точке перехода наблюдается изменение *теплоемкости*, объемного коэффициента теплового расширения, сжимаемости. К фазовым переходам второго рода относят, например, переход нормального проводника в сверхпроводящее состояние (см. *Сверхпроводимость*), гелия I — в сверхтекучий гелий II (см. *Сверхтекучесть*), ферромагнетика — в парамагнетик (см. *Магнетизм*) и т. д.

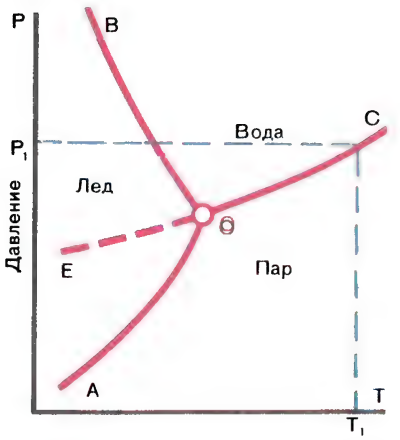
Состояние фазового равновесия характеризуется определенной связью между температурой фазового превращения и давлением. Так, температура плавления или кипения зависит от внешнего давления, а давление насыщенного пара имеет вполне определенное значение при данной температуре. Численно эта зависимость для фазовых переходов первого рода дается уравнением Клапейрона — Клаузиуса, согласно которому $\Delta p/\Delta T = q/T\Delta v$. Поскольку при плавлении тепло поглощается ($q > 0$), а объем жидкой фазы обычно больше объема твердой ($\Delta v > 0$), то температура плавления, как правило, растет с увеличением давления. Исключение составляют случаи, когда объем при затвердевании возрастает (висмут, галлий, вода, чугун). Эффект обычно мал, порядка 10^{-2} К/атм. Давление насыщенного пара всегда растет с ростом температуры.

Фазовое равновесие удобно изображать с помощью диаграмм. Для простейшей однокомпонентной системы, состоящей из одного вещества, например воды, такая диаграмма приведена на рис. 1. Ниже линий OA и OC, т. е. при низких давлениях и высоких температурах, находится область, отвечающая устойчивости пара, между линиями OB и OC — жидкости и между линиями OA и OB — твердого льда. Внутри каждой из этих областей можно произвольно и независимо менять два параметра — температуру T и давление p, оставаясь в области устойчивости одной из фаз.

Состояния системы, описываемые линиями OA, OB и OC, соответствуют равновесию между двумя фазами, например OC — равновесию между водой и паром.

В точке пересечения всех трех кривых, так называемой тройной точке, находятся в равновесии три фазы (лед, вода, пар). В тройной точке температура и давление строго заданы (например, для воды 0,0078°С и 4,579 мм рт. ст.).

Пунктирная линия OE на рис. 1, являющаяся продолжением линии OC, показывает зависимость давления пара переохлажденной воды от температуры. Оно, очевидно, всегда выше, чем давление пара льда. Такая фаза неустойчива (метастабильна) в присутствии более устойчивой фазы. Возможность существования метастабильных фаз (перегрева и переохлаждения) — характерная особенность фазовых переходов первого рода. Перегрев и переохлаждение связаны с необходимостью зат-



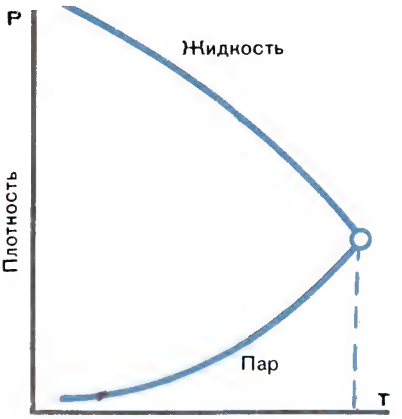


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия однокомпонентной системы. Тройная точка *O* на диаграмме соответствует равновесию трех фаз — льда, воды, пара.

Рис. 2. При критической температуре плотность водяного пара и плотность воды становятся равными.

раты энергии на образование зародышей новой фазы (кристалликов льда, капелек жидкости, пузырьков пара). Если для перевода пара и жидкости в другую фазу приходится прибегать к разным ухищрениям (например, пузырьки пара легко образуются на пылинках, значит, перегретая вода должна быть предельно чистой), то для кристаллов возможность длительно, устойчиво существовать в неустойчивых фазах — почти что правило. Так, вполне устойчив алмаз, который при комнатной температуре и атмосферном давлении должен быть графитом. Белое олово должно превращаться в порошок серого олова (оловянная чума) при 18°. Однако известно, что оно спокойно выдерживает переохлаждение на 20—30 градусов. И все же в условиях суровой зимы превращение олова происходит. Незнание этого было одной из причин гибели экспедиции Р. Скотта на Южный полюс в 1912 г. Запасы жидкого топлива экспедиции находились в сосудах, запаянных оловом. При больших холодах сосуды распаялись, и топливо вытекло.

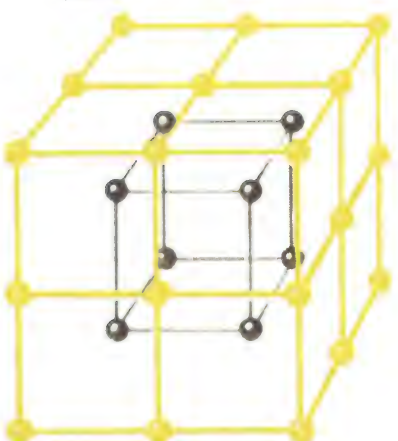
На поверхности раздела, отделяющей одну фазу от другой, свойства обычно меняются скачком. Так, например, плотность водяного пара много меньше плотности воды. Но если повышать температуру, они сближаются (рис. 2) и при некоторой критической температуре становятся равными. К р и т и ч е с к о й называют т е м п е р а т у р у, при которой исчезает различие в физических свойствах между жидкостью и насыщенным паром. Соответствующее давление называется к р и т и ч е с к и м д а в л е н и е м. При температурах ниже критической существуют два легко отличимых состояния воды — п а р и *жидкость*. При температурах выше критической вещество находится в однородном парообразном состоянии. Если уменьшать объем, занятый этим паром,то давление возрастает, но пар не превращается в жидкость. Двух состояний с резкой границей нельзя получить ни при каком давлении (как это бывает ниже критической температуры из-за конденсации пара). Поэтому так долго не удавалось М. Фарадею сконденсировать кислород и водород путем увеличения давления; их нужно было охладить ниже критической температуры.

Для каждого вещества характерны свои критические температура и давление. Например, для ртути это 1730°С и около 1640 атм, для воды — 374°С и 218,4 атм, углекислого газа — 31°С и 73 атм, кислорода — —118°С и 50 атм, водорода — —240°С и 12,8 атм, гелия — —268°С и 2,26 атм. Удельная теплота парообразования уменьшается с ростом температуры и при критической температуре равна нулю.

Температура фазового перехода второго рода также зависит от давления. Но, как уже говорилось, тепловой и объемный эффекты равны нулю, и зависимость эта определяется изменением в точке фазового перехода теплоемкости, коэффициента расширения и сжимаемости.

Фазовые переходы второго рода связаны с изменением порядка. Это можно понять на примере фазового перехода в бета-латуни — сплаве меди с цинком. Атомы меди, изображенные на рис. 3 светлыми кружками, расположены в

Рис. 3. Фазовые переходы второго рода связаны с изменением порядка атомов, например в сплаве меди с цинком.



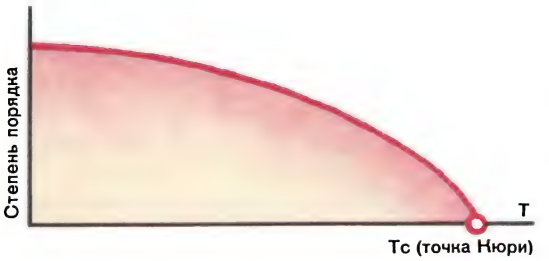


Рис. 4. При некоторой температуре — точке Кюри — возникает высокотемпературная разупорядоченная фаза.

вершинах куба, атомы цинка (темные кружки) — в центре (или наоборот). При идеальном порядке каждый атом меди имеет в качестве ближайших соседей только атомы цинка. Но при повышении температуры увеличивается вероятность для атома занять «чужой» узел. До тех пор пока эти вероятности (w_1 — вероятность занять «свой» узел и w_2 — «чужой») разные (атомы больше «сидят» в «своих» «узлах»), узлы неэквивалентны, и симметрия (две кубические решетки, вставленные одна в другую, со сдвигом на половину объемной диагонали) не меняется. Это низкотемпературная упорядоченная фаза. Однако при некоторой температуре, большей или равной температуре фазового перехода (T_c — точка Кюри, названная по имени французского физика П. Кюри, открывшего, в частности, в 1895 г. существование температуры $T_c = 770^\circ$C, выше которой исчезают ферромагнитные свойства железа), становится $w_1 = w_2$. Теперь все узлы эквивалентны, и симметрия повышается: бета-латунь имеет решетку объемно-центрированного куба. Возникла высокотемпературная разупорядоченная фаза с новой, более высокой симметрией (рис. 4).

Можно ввести степень порядка $\eta = (w_1 - w_2) : (w_1 + w_2)$. В полностью упорядоченном состоянии, при абсолютном нуле температуры, $w_1 = 1$, $w_2 = 0$ (все атомы «сидят» в «своих» узлах) и $\eta = 1$, а в полностью разупорядоченном ($T \geqslant T_c$) $w_1 = w_2 = 1/2$ (все узлы одинаковы) и $\eta = 0$. При любом как угодно малом $\eta > 0$ симметрия та же, что и у вполне упорядоченной фазы. Аналогичным образом объясняются и другие фазовые переходы второго рода. Так, железо ниже T_c обладает ферромагнитными свойствами, а выше — парамагнитными (см. *Магнетизм*). Исчезновение ферромагнетизма при нагревании связано с изменением порядка в расположении *магнитных моментов — спинов*.

Вблизи T_c степень порядка сколь угодно близка к нулю. Поэтому фазовый переход второго рода не требует затрат энергии: тепловой и объемный эффект равны нулю. Этим же объясняется то, что неупорядоченный сплав нельзя переохладить до упорядоченного состояния.

ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

Задачи физики — выявить и понять связи между наблюдаемыми величинами. Количественное совпадение предсказаний с опытом — наиболее убедительная проверка понимания. Еще в XVIII в. итальянский ученый А. Вольта говорил: «Что можно сделать хорошего, особенно в физике, если не сводить все к мере и степени?»

Количественное описание физического мира невозможно без математики. Математика не только дает способы решения уравнений физики, но и создает методы описания, соответствующие характеру физической задачи. Так, например, для решения плоских задач гидродинамики используется теория комплексных чисел. Во всех областях физики, где встречаются векторы (вектор скорости, вектор электрического поля и т. д.), используется векторное исчисление.

Приложением математики к физическим задачам занимаются физики-теоретики (см. *Теоретическая физика*.

Не означает ли это, что теоретическая физика представляет собой нечто вроде прикладной математики? Это совершенно неверно. И по характеру задач, и по методам подхода к задачам математика и физика категорически различаются.

В математике важнейшую роль играет логическая строгость, т. е. безупречность всех выводов, вместе с исследованием всех логически возможных соотношений, вытекающих из принятых аксиом. Задача физики — воссоздать по возможности точную картину мира, используя все известные экспериментальные и теоретические факты, основанные на интуиции догадки, которые в дальнейшем будут проверены на опыте. Так, математик исследует все логически возможные типы геометрий; физик же выясняет, какие геометрические соотношения осуществляются в окружающем мире.

Математические построения сами по себе не имеют отношения к свойствам окружающего мира, это чисто логические конструкции. Они приобретают смысл физических утверждений, только когда применяются к реальным физическим телам. Геометрия Евклида применялась к треугольникам и многоугольникам, сколоченным из дерева или отмеренным на поверхности Земли. Закрепив конец веревки и вращая второй конец, можно очертить круг, и для этого круга отношение длины окружности к радиусу могло бы отличаться от предписаний евклидовой геометрии. Если бы это случилось на самом деле, это не означало бы неправильности евклидовой геометрии. Это означало бы только, что аксиомы, принятые в евклидовой геометрии, не осуществляются в реальном мире. Геометрия Евклида не единственная возможная геометрия. Русский математик Н. И. Лобачевский был

первым, построившим последовательный, до конца доведенный пример неевклидовой геометрии.

Математик получает соотношения, не интересуясь тем, для каких физических величин они будут использованы. Одно и то же уравнение для функции $y(x)$ описывает одновременно множество физических объектов; $y(x)$ может означать перемещение частицы как функцию времени; смещение точки балки при нагрузке как функцию положения этой точки, разность потенциалов на обкладках конденсатора как функцию времени. Именно эта замечательная общность делает математику универсальным инструментом для изучения всех естественных наук.

Физика интересуют не так методы решения, как вопрос о том, насколько законны упрощения, которые пришлось сделать, чтобы получить уравнения, с какой точностью и при каких значениях переменных они правильно описывают явления, и, наконец, самый важный вопрос — от каких предположений придется отказаться и как изменится наш взгляд на все другие известные явления, если результат не подтвердится на опыте.

Математик, даже если он занимается прикладными задачами, пришедшими не из математики, берется за решение только тех проблем, которые не требуют дополнительных недоказанных предположений. Физик же, как правило, имеет дело с задачами, в которых имеющихся исходных данных недостаточно для решения, и искусство состоит в том, чтобы угадать, какие недостающие соотношения реализуются в природе. Именно для этих догадок требуется не математическая, а физическая интуиция.

Убедительность в физике достигается получением одного и того же результата из разных исходных предпосылок, при этом приходится вводить лишние, логически необязательные аксиомы, каждая из которых сама по себе не абсолютно достоверна. Единственное условие состоит в том, чтобы уметь оценивать степень убедительности того или иного предположения и ясно понимать, какие из них требуют дальнейшей проверки.

Если какая-либо область физики достигнет такого развития, что все ее результаты можно будет вывести из нескольких строго установленных экспериментально аксиом, то эта область перестанет быть частью развивающейся физической науки и перейдет в раздел прикладной математики или техники. Так произошло с классической и релятивистской *механикой* и с классической *электродинамикой*.

Разумеется, очень полезно анализировать структуру физической теории, т. е. выяснять, из каких исходных предпосылок получаются те или иные результаты. Однако центр тяжести в таком аксиоматическом подходе не в общности и математической строгости выводов, а в правильном выборе исходных предположений и в оценке того, какие из них наиболее достоверно подтверждены опытом, а для этого требуется интуиция физика. В тех случаях, когда эту работу проделывает математик, он обязательно, хотя бы на время, делается физиком-теоретиком. Иначе он рискует оказаться, по выражению польского сатирика Е. Леца, в положении эскимоса, который вырабатывает для жителей Конго правила поведения во время жары.

Итак, математика и физика — науки с разными задачами и разными методами подхода к задачам.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАДОКСЫ

Словарь В. И. Даля определяет слово «парадокс» так: «мнение странное, на первый взгляд дикое, озадачливое, противное общему». Это определение годится и для научного парадокса, нужно только добавить, что такое мнение должно быть убедительно обосновано.

Со времен Галилея известно, что все тела падают с одинаковым ускорением (если отвлечься от сопротивления воздуха). Это означает, что вес тела, т. е. сила, с которой тело притягивается к Земле, строго пропорционален его *массе*. Закон *движения* тела определяется, если эту силу приравнять произведению его массы на ускорение. И левая и правая части равенства строго пропорциональны массе, и масса сокращается. Закон движения тела в поле тяжести не зависит от его массы. По этой же причине человек в свободно падающем лифте находится в состоянии невесомости — сила тяжести строго компенсируется силой инерции (см. *Система отсчета*).

Мы так свыклись с этими фактами, что не замечаем здесь никакой странности. Почему вес тел независимо от их состава, независимо от их состояния пропорционален массе, мере *инерции*? Не следует ли из этого парадокса, что между инерцией и гравитацией (силами *тяготения*) есть глубокая внутренняя связь? С этой мысли началось построение одной из самых удивительных физических теорий — теории тяготения Эйнштейна.

Согласно теории тяготения, вблизи тяжелых масс геометрия пространства изменяется — она отличается от нашей привычной, евклидовой геометрии. Из-за этого изменения геометрии свет распространяется не по прямой. Это искривление лучей света было обнаружено при фотографировании света далеких звезд, проходящего мимо Солнца.

Почему звезды дают так мало света? Предположим, что звезды заполняют Вселенную

более или менее равномерно. Тогда число звезд, лежащих внутри сферы радиуса R, окружающей Землю, растет пропорционально R^3 В то же время интенсивность света от каждой отдельной звезды, как известно, падает пропорционально $1/R^2$. Следовательно, полная интенсивность света от звезд, лежащих внутри сферы, пропорциональна R, и если бы Вселенная была бесконечна, яркость неба лимитировалась бы только ничтожным поглощением света в межзвездном пространстве. Небо должно было бы сиять «ярче тысячи солнц». Этот парадокс был известен очень давно, но оставался неразгаданным.

Не менее странно и то, что электромагнитное излучение в межзвездном пространстве не находится в равновесии со звездами — звезды горячие, а плотность энергии электромагнитного поля практически равна нулю. По законам *статистической физики*, температуры должны выравниваться. За достаточно большое время звезды должны были померкнуть, а все межзвездное пространство — заполниться излучением. Значит, Вселенная существует конечное время и еще не пришла к равновесию.

Оба эти парадокса нашли свое объяснение в *космологии* Эйнштейна, которая представляет собой удивительное по смелости применение теории тяготения к миру в целом.

Согласно его теории, Вселенная расширяется и геометрия ее совпадает с евклидовой только для объектов малого размера (см. *Пространство*). Примерно 20 млрд. лет тому назад Вселенная была сверхгорячей. До нас доходит свет конечного числа звезд, лежащих на расстоянии, меньшем чем 20 млрд. световых лет.

Скачок в понимании Вселенной, связанный с переходом от плоского пространства евклидовой геометрии к пространству, имеющему кривизну, подобен тому скачку, который сделало человечество, обнаружив, что Земля не плоская, а имеет форму шара.

Очень глубокий парадокс возник в начале XX в. в результате применения законов *статистической физики* к необычному для нее объекту — к стоячим *электромагнитным волнам*, которые могут возникать в ящике с отражающими стенками. Согласно этим законам, каждое независимое колебание в тепловом равновесии из-за многократных излучений и поглощений стенками должно приобрести энергию kT, где T — абсолютная температура стенок, а k — число, которое называется постоянной Больцмана. Но число возможных стоячих электромагнитных волн в ящике бесконечно. Действительно, стоячие волны могут образоваться в нем, если от стенки до стенки укладывается целое число полуволн. Чем короче длина волны, тем больше возможных направлений, для которых это условие выполняется. А значит, чем короче длина волны, тем больше число возможных колебаний. Следовательно, электромагнитное поле должно было бы забрать на себя всю тепловую энергию стенок, сколько бы тепла мы к ним ни подводили. Если бы на каждое колебание, действительно, приходилась энергия kT, то, сделав дырку в ящике, мы получили бы источник ни с чем не сравнимой яркости. Этому парадоксу дали драматическое название — «катастрофа Рэлея—Джинса», хотя на опыте никакой катастрофы не происходит.

Пытаясь найти выход из этого противоречия, М. Планк предположил, что электромагнитные колебания изменяют свою энергию порциями $\Delta E = \hbar\omega$, где $\hbar$ — коэффициент пропорциональности, а ω — частота колебаний. Если минимальная возможная энергия колебания $\hbar\omega$ много больше kT, то колебание будет иметь малую интенсивность. Согласно законам статистической физики, интенсивность такого колебания падает с увеличением частоты по экспоненциальному закону ($y = e^x$). Таким образом, высокочастотные колебания вносят малый вклад в тепловую энергию, и парадокс разрешается. Этот закон с колоссальной точностью выполняется на опыте, что позволяет определить величину $\hbar$.

Так впервые в физику вошла постоянная Планка $\hbar$, характеризующая возможные дискретные значения энергии электромагнитных колебаний данной частоты, так возникло представление о скачкообразных процессах. Минимальная порция энергии электромагнитного колебания была названа квантом. Если энергия колебания содержит n порций $\hbar\omega$, то говорят, что в ящике имеется n квантов частоты ω.

Почему *атомы* испускают свет не всех частот, а только дискретных, точно определенных? Если бы *электроны* в атоме двигались по законам классической *механики*, они испускали бы свет всех частот. Не означает ли это, что электроны в атоме, подобно электромагнитным колебаниям, могут иметь не любые энергии, а только строго определенные?

Размышления над этим и другими парадоксами привели Н. Бора к созданию квантовой модели атома.

«Сверхтеплопроводность» или «сверхтекучесть»? Еще один пример — открытие явления *сверхтекучести*, сделанное в Институте физических проблем АН СССР в 1938 г. советским академиком П. Л. Капицей.

Изучались свойства жидкого гелия при низких температурах. Было известно, что при температурах, меньших чем 2,2K (или $-270{,}8^\circ$ C), жидкий гелий переходит в другую модификацию — гелий II с совершенно отличными свойствами. Как было обнаружено в Лейдене нидерландским физиком В. Кеезомом, гелий II имеет *теплопроводность*, в 10^6 большую, чем медь, что уже само по себе очень странно. Затем обнаружилось, что у гелия II

аномально малая *вязкость* — в 10^3 меньшая, чем у воды. Между тем микроскопические механизмы теплопроводности и вязкости очень схожи, и при большой теплопроводности всегда возникает и большая вязкость. Ведь теплопроводность определяется скоростью передачи от слоя к слою тепловой энергии, а вязкость — скоростью передачи количества движения. Чем больше одно, тем больше и другое, а у гелия получалось наоборот.

Размышления над этим парадоксом привели П. Л. Капицу к идее, что никакой «сверхтеплопроводности» нет, что большая теплопередача, обнаруженная В. Кеезомом, обусловлена потоками, возникающими в гелии II из-за того, что он находится в состоянии *сверхтекучести*. В этом состоянии жидкий гелий может проходить через трубки без всякого *трения*. Поэтому достаточно самой малой неоднородности плотности, возникающей при разности температур, чтобы под влиянием силы тяжести появились потоки, переносящие тепло.

Чтобы эта идея превратилась в достоверную истину, П. Л. Капице понадобилось поставить десятки тончайших экспериментов.

Первоклассный экспериментатор П. Л. Капица обсуждал свои эксперименты с первоклассным теоретиком Л. Д. Ландау. Теория и эксперимент стимулировали друг друга. В результате такого взаимодействия Ландау создал одну из своих самых интересных теорий — теорию жидкого гелия II. С помощью этой теории удалось количественно описать все обнаруженные П. Л. Капицей экспериментальные факты.

Вот парадокс, возникший и решенный совсем недавно. Анализируя свойства *элементарных частиц*, физики пришли к заключению, что все *адроны* состоят из *кварков* и антикварков — частиц, имеющих дробный электрический заряд. Но вскоре возник парадокс: несмотря на все попытки, обнаружить кварки не удалось.

Размышления над этим парадоксом привели физиков-теоретиков к созданию теории *сильного взаимодействия*, согласно которой кварки есть частицы особого рода: они существуют только в связанном состоянии, их нельзя извлечь из адронов.

ФЛУКТУАЦИИ

Флуктуациями называют небольшие нерегулярные, хаотические изменения какой-либо физической величины. Так изменяется, например, длина колонны марширующих солдат, и если мы говорим, что колонна растянулась на сто метров, то мы хорошо понимаем, что это ее средняя длина и что в разные моменты времени она может быть на несколько метров длиннее или короче.

В физике под флуктуациями обычно понимают хаотические изменения какой-либо величины, связанные с тепловыми движениями или же с квантовыми эффектами (см. *Квантовая механика*). Известно, что *температура* одноатомного газа определяется кинетической энергией атомов. Но из-за столкновений атомов энергия каждого из них не остается постоянной, а все время изменяется. Если взять большой объем газа, то энергия, усредненная по всем атомам, будет практически постоянна. Если же газа в сосуде мало, то флуктуации энергии будут больше. Величина флуктуации обратно пропорциональна корню квадратному из числа частиц N. Это значит, что температура T_0 газа, находящегося в тепловом равновесии, на самом деле не строго равна T_0, а изменяется все время в пределах от $T_0 - \Delta T$ до $T_0 + \Delta T$, где величина $\Delta T \simeq \frac{1}{\sqrt{N}} T$. Так как число атомов обычно велико, то ΔT очень мало (напомним, что 4 г гелия содержат $N_A \simeq 6 \cdot 10^{23}$ частиц).

Флуктуируют и другие физические величины. Давление газа на стенку сосуда складывается из ударов отдельных частиц. Его можно считать постоянным только за такие промежутки времени, когда число ударов о стенку очень велико. И в этом случае флуктуация давления пропорциональна $1/\sqrt{N} : \Delta p \sim (1/\sqrt{N})p$.

Если в газе или в жидкости находится маленькая пылинка, то из-за хаотических ударов молекул с разных сторон ее координаты будут хаотически изменяться. Пылинка будет двигаться по хаотической траектории. Это явление, называемое *броуновским движением*, было объяснено А. Эйнштейном и послужило в свое время доказательством реальности существования молекул.

Флуктуации температуры и давления газа измерить трудно. Сравнительно проще измерить флуктуации электрических величин. Так, в проводнике, не подсоединенном ни к какому источнику тока, возникает флуктуационный ток, величина и направление которого хаотически изменяются. Такой флуктуационный ток или связанную с ним флуктуационную электродвижущую силу можно вычислить и измерить. Ее величина оказывается пропорциональной $\sqrt{T}$. Так как в формулы входит абсолютная температура, то измерение флуктуации проводят для точного определения температуры.

В потоке света, в лазерном пучке причиной флуктуаций служит также квантовая природа света: свет поступает на прибор не непрерывным потоком, а квантами, временны́е интервалы между которыми хаотически изменяются.

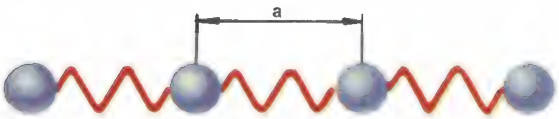
Измерение квантовых флуктуаций, зависящих от температуры, используют в метрологии.

ФОНОН

Так называют *квазичастицу*, соответствующую возбуждению волн колебаний *атомов* в веществе. Каждая *волна* характеризуется амплитудой колебаний и соответственно *энергией*. Ее энергия в классической физике может иметь любое значение. Однако в *квантовой механике* энергия принимает дискретный ряд значений. Энергия колебательной системы может меняться только на величину, кратную $\hbar\omega$, где ω — частота *колебаний*.

Так же как *электромагнитной волне* сопоставляются кванты излучения — *фотоны*, волне колебаний атомов в веществе соответствуют квазичастицы — *фононы*. Вместо того чтобы говорить об увеличении амплитуды колебаний атомов вещества, можно сказать, что рождаются новые фононы.

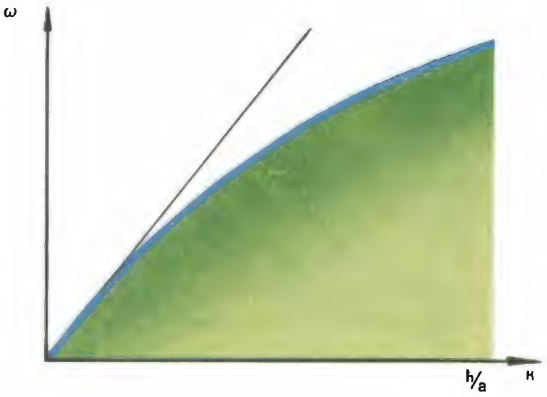
При высоких температурах, когда фононов много, дискретность энергии становится незаметной, а вот при *низких температурах* можно различать отдельные фононы, и это — самый



удобный способ описывать волны колебаний атомов.

В *твердом теле* могут распространяться разные типы волн смещений атомов. Представьте себе простейшую модель твердого тела: цепочка шариков, связанных пружинками (рис. 1). Шарики — это атомы, а пружинки моделируют взаимодействие между ними: на больших расстояниях атомы притягиваются, а на малых — отталкиваются (см. *Молекула*). В такой системе могут распространяться, во-первых, продольные волны сжатия — разрежения, когда смещения атомов происходят в направлении распространения волны. А во-вторых, поперечные волны, когда колебания атомов происходят в направлении, перпендикулярном распространению волны (вспомните натянутую струну, которую оттянули в каком-то месте и отпустили). Говорят, что такие волны различаются п о л я р и з а ц и е й.

Рис. 2. Частота колебаний линейной цепочки.



Частота колебаний атомов зависит от длины волны. Чем больше длина волны, тем медленнее могут происходить колебания, так как в фазе должны колебаться только далекие друг от друга атомы. Обычно изображают графически зависимость частоты колебаний от волнового числа k, обратно пропорционального длине волны $\lambda(k = 2\pi/\lambda)$ (см. *Волна*). Для нашей цепочки такая зависимость показана на рис. 2. При больших длинах волн (малые k) дискретность цепочки становится несущественной, и волны по ней распространяются, как в сплошной среде, с постоянной скоростью u. В этом случае частота ω увеличивается с ростом k по линейному закону ($\omega = ku$, черная линия на рис. 2). *Волны* такого типа называются

Рис. 1. Модель линейной цепочки атомов (*вверху*).

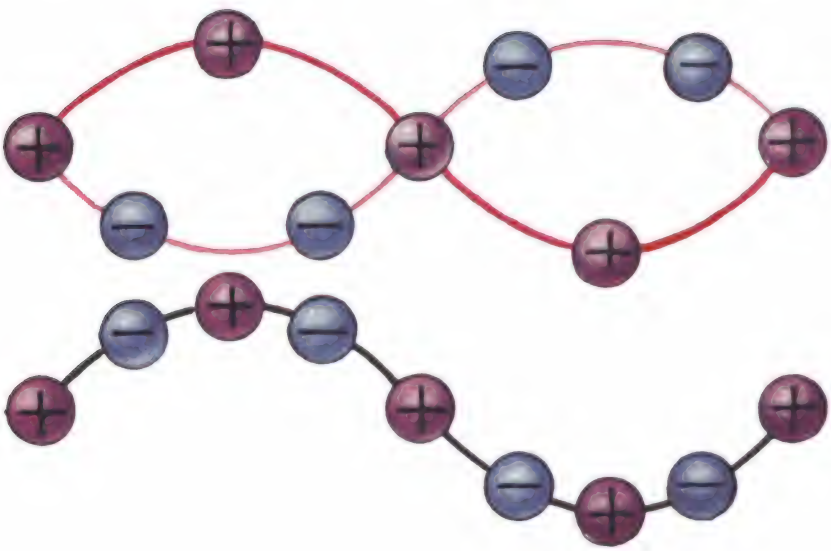


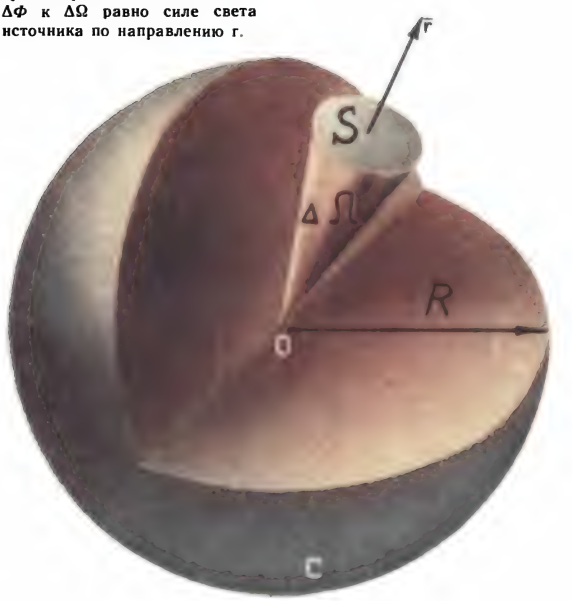
Рис. 3. Два типа колебаний частиц в линейной цепочке из атомов двух сортов.

акустическими, так как они соответствуют распространению *звука* в твердом теле. Такое же название имеют и соответствующие фононы.

В твердом теле существует максимальная частота колебаний и соответственно максимальная энергия фонона. В простейшей модели одномерной цепочки (рис. 1) она соответствует волне с минимальной длиной, равной двум межатомным расстояниям (легко понять, что, когда длина волны равна межатомному расстоянию, происходит просто сдвиг цепочки как целого). Максимальная частота колебаний обычно имеет порядок $10^{12} \div 10^{13}$ Гц.

Если твердое тело состоит, например, из атомов разных сортов, то становится возможным распространение еще одного типа волн (рис. 3, для наглядности показаны поперечные волны с одинаковой длиной волны). Если чередующиеся атомы — это, например, ионы с зарядами разного знака, то колебания такого типа можно возбудить переменным электрическим полем (световой волной). Поэтому такие *волны* называются оптическими. Соответствующие *фононы* в твердом теле также называют оптическими.

Рис. 1. В малом телесном угле $\Delta\Omega$ источник O излучает световую энергию $\Delta\Phi$. Отношение $\Delta\Phi$ к $\Delta\Omega$ равно силе света источника по направлению r.



ФОТОМЕТРИЯ

Мы говорим о ярком небе, о солнечном световом потоке, об освещенности наших комнат и силе света ламп накаливания, иногда и не подозревая, что все эти понятия строго определены в разделе *оптики*, называемом *фотометрией*. Этот раздел посвящен измерению светового излучения по его зрительному ощущению, а в более широком смысле — измерению энергии, переносимой электромагнитным излучением оптического диапазона.

Основная фотометрическая единица в системе СИ — кандела (Кд) (от латинского слова, означающего «свеча»). Этот термин происходит от названия эталона основной единицы силы света — международной свечи, которым пользовались до введения в 1948 г. современного эталона. Международная свеча равна 1,005 Кд и выполнена в виде электрической лампы накаливания особой конструкции.

В канделах измеряют силу света. Если $\Delta\Phi$ — поток световой энергии в малом телесном угле $\Delta\Omega$, то сила света I по направлению оси телесного угла равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}$ (рис. 1). Одна кандела равна 1/60 силы света, излучаемого Государственным световым эталоном в направлении нормали AB (рис. 2). У точечного источника силой света в 1 Кд, одинаковой по всем направлениям, полный световой поток Φ равен 4π люмен (лм).

Инспекцией по охране труда установлены нормы освещенности цехов заводов и фабрик, лабораторных помещений, больниц и т. д. Освещенность измеряется в люксах (лк) и равна световому потоку, равномерно распределенному по площади 1 м^2 (1 лк = 1 лм/м^2). Освещенность земной поверхности в ясный солнечный день 100 000 лк, для чтения книги вполне достаточно 60 лк, читать с напряжением можно уже при освещенности 1 лк. Наименьшая освещенность рабочего места, которая еще допускается,— 10 лк. Освещенность измеряют прибором, называемым люксметром,— это

Рис. 2. Государственный световой эталон СССР. *1* — нагретая до температуры плавления токами высокой частоты платина; *2* — излучающая трубочка из литого оксида тория; *3* — сосуд из того же материала; *4* — засыпка; *5* — кварцевый сосуд. Даны размеры в миллиметрах.

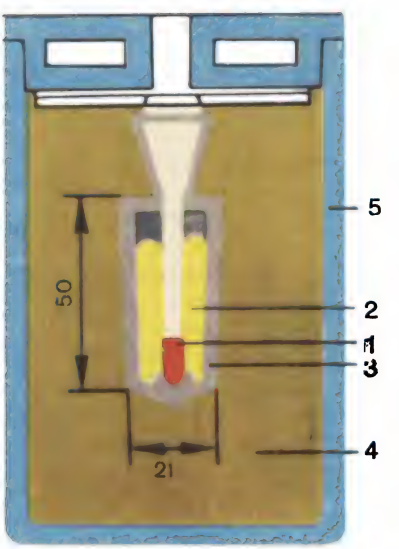
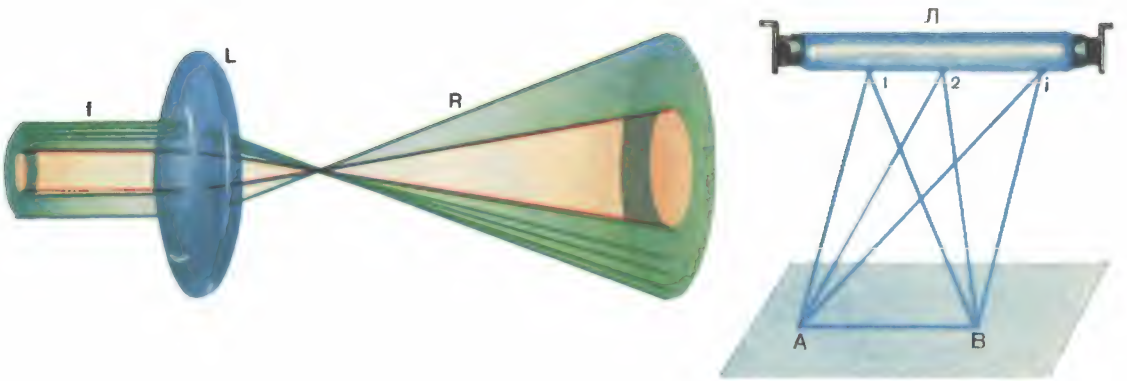


Рис. 3а. Величина освещенности удаленного предмета прожектором не изменится при увеличении размеров источника, так как при этом пропорционально увеличится и освещаемая площадь.

Рис. 3б. В освещенность участка стола AB вклад дает каждый элемент 1, 2... i люминесцентной лампы $Л$.



фотоэлемент с подключенным к нему измерителем тока, шкала которого проградуирована в люксах.

Если требуется передать световую энергию на большие расстояния, скажем осветить высоко летящий самолет или с помощью светового локатора-дальномера определить расстояние до предмета, используют источник света высокой яркости (рис. 3). Понятие я р к о с т и главное в фотометрии. Яркость B элемента поверхности источника света $\Delta\sigma$ в направлении вектора $\bar{i}$, составляющего с нормалью $\bar{n}$ к поверхности угол i, равна $B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma\cos i\Delta\Omega}$ (рис. 4)

Очень важная величина — яркость, или интенсивность, светового потока: $R = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma\cos i\Delta\Omega}$

В этом случае величина $\Delta\sigma$ — воображаемая в пространстве площадка, $\Delta\Phi$ — проходящий через нее световой поток в телесном угле $\Delta\Omega$ по направлению i. В принципе B и R — одинаковые понятия. Ведь площадка $\Delta\sigma$ может быть выбрана и на поверхности светящегося тела. Когда мы говорим о яркости неба или лазерного луча, подразумеваем яркость светового потока. Яркость измеряют в единицах, называемых НИТ (нт) (1 НИТ = 1 Кд/м^2). Вот характерные яркости источников света: яркость Луны — $2{,}5\cdot10^3$, лампы накаливания — $5\cdot10^6$, Солнца — $1{,}5\cdot10^9$, яркость искрового разряда в гелии — $1,\ 5\cdot10^{12}$ нт.

Чувствительность человеческого глаза, как и всякого другого приемника света, зависит от длины световой волны. Мощность в 0,00147 Вт светового излучения с длиной волны 0,555 мкм, соответствующей максимальной чувствительности глаза, дает световое ощущение, вызываемое световым потоком, равным 1 лм. Величина $A = 0{,}00147$ Вт/лм носит название м е х а н и ч е с к о г о э к в и в а л е н т а с в е т а. С помощью величины A можно связать энергию электромагнитного излучения E в интервале длин волн $\Delta\lambda$, выраженную в ваттах, с величиной светового потока Φ в люменах: $\Phi(\lambda_1\lambda + \Delta\lambda) = V(\lambda)/AE(\lambda_1\lambda + \Delta\lambda)$ лм. При этом в и д н о с т ь — величину $V(\lambda)$ — следует определять по кривой видимости (рис. 5); $V(\lambda)$ — безразмерная величина, и, следовательно, размерность светового потока такая же, как и размерность потока энергии. Таким образом, световой поток представляет собой поток световой энергии, оцениваемый по зрительному впечатлению.

Световые потоки измеряют ф о т о м е т р а м и. В простом фотометре две части светлого поля освещены сравниваемыми источниками света (рис. 6). Когда грани белой рассеи-

Рис. 4. Яркость площадки $\Delta\sigma$ вдоль вектора $\bar{i}$ определяется углом i между нормалью n и вектором $\bar{i}$, а также отношением светового потока $\Delta\Phi$, излучаемого площадкой $\Delta\sigma$ в телесном угле $\Delta\Omega$, к величине этого угла.

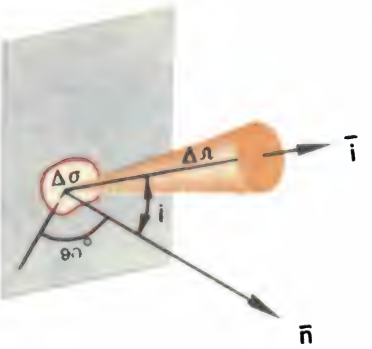


Рис. 5. Кривая видимости глаза (λ — длина световой волны).

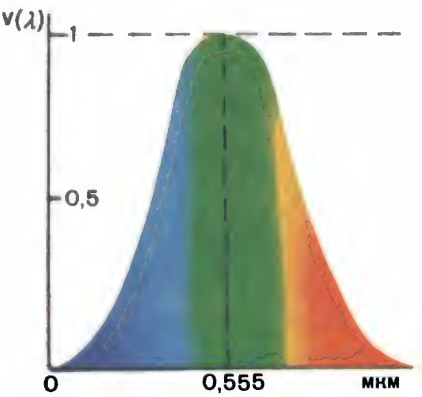


Рис. 6. Для сравнения силы света источника S_2 с эталонным источником S_1 их помещают на расстояниях r_2 и r_1 так, чтобы освещенности граней рассеивающей призмы стали одинаковыми. Равенство освещенностей определяется по зрительному впечатлению, когда поля граней сливаются для наблюдателя в одно целое.

Рис. 7. Внутри фотометрический шар окрашен белой матовой краской (*1*). Освещенность любой точки шара, защищенной экраном (*2*) от прямых лучей находящегося в шаре источника (*3*), пропорциональна световому потоку этого источника. Освещенность экранированного участка измеряется, например, с помощью встроенного в шар фотоэлемента.

вающей призмы одинаково освещены, по расстояниям источников от граней можно рассчитать отношение их силы света. Для измерения полного потока источника света применяют фотометрический шар (рис. 7).

Поток, освещенность, яркость потока лазерного излучения выражают, как правило, в энергетических единицах: Вт, Вт/м^2, Вт/ср · м^2. Это связано с тем, что излучение многих *лазеров*, нашедших широкое применение в технике, лежит в инфракрасной области спектра, не воспринимаемой глазом. Кроме того, лазеры работают не только в постоянном, но и в импульсном режиме с длительностью импульсов от 10^{-6} до 10^{-13} и даже менее. Зрительное ощущение светового импульса зависит не только от его мощности, но и от длительности. Поэтому фотометрические характеристики импульсных источников проще выражать в энергетических единицах.

Пространственная когерентность лазерного излучения дает возможность получать пучки очень высокой яркости. Так, яркость потока гелий-аргонового лазера ($\lambda = 0{,}514$ мкм), работающего в непрерывном режиме, порядка 10^{13} Вт/ср·м^2. Если лазер излучает в видимой области спектра, то нетрудно перейти от энергетических единиц к световым — следует умножить энергетическую величину на коэффициент $V_\lambda / A = 680\, V_\lambda$, где V_λ — видность излучения лазера. Например, энергетическая яркость гелий-аргонового лазера 10^{13} Вт/ср · м^2 эквивалентна $\sim 4 \cdot 10^{15}$ нт. Эта величина примерно в 2,5 млн. раз больше яркости Солнца. Измеряют мощность лазерного излучения, форму его импульса и длительность с помощью фотоэлектрической аппаратуры, фотоумножителей, болометров, фотоэлементов. Такое измерение — сложная фотометрическая задача.

ФОТОН

Фотон — квант электромагнитного поля, элементарная частица с нулевой *массой* покоя и *спином*, равным единице. Фотон — наиболее распространенная из всех *элементарных частиц*. Он встречается и в потоках видимого света, и в рентгеновском излучении, и в виде радиоволн, и в лазерных импульсах. В 1964 г. американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили, что мировое пространство заполнено миллиметровыми радиоволнами, которые можно рассматривать как холодный фотонный газ при температуре 2,7 К. По современным представлениям, это излучение (его называют реликтовым) возникло на ранних стадиях развития Вселенной, когда вещество находилось при огромной температуре и давлении (см. *Космология*). Средняя плотность реликтовых фотонов составляет около 500 штук в 1 см^3. Это число можно сравнить с распространенностью *протонов*, из которых построен окружающий нас мир: во Вселенной в среднем имеется не более одного протона на 1 м^3. Таким образом, во Вселенной фотоны встречаются в миллиард раз чаще, чем протоны.

Необычна историческая судьба фотона; пожалуй, это единственная элементарная частица, для которой нельзя указать автора ее экспериментального открытия. Фотон был открыт теоретически М. Планком, который 14 декабря 1900 г. на заседании Берлинского физического общества высказал свою гипотезу о квантовании энергии излучения. С этого момента в физике началась квантовая эра. Развивая

идею Планка, А. Эйнштейн в 1905 г. предположил, что свет не только излучается и поглощается отдельными порциями, но и состоит из них. Это было смелое и необычное обобщение. Например, мы всегда пьем воду порциями, глотками, но отсюда не следует, что вода состоит из отдельных глотков. По теории Эйнштейна, *электромагнитная волна* стала выглядеть как поток квантов.

Гипотеза Планка позволила объяснить закономерности *фотоэффекта, люминесценции* и ряда других явлений. Наиболее ярко корпускулярные свойства электромагнитного излучения проявились в экспериментах А. Комптона по рассеянию *рентгеновских лучей* на свободных *электронах* (1922). *Эффект Комптона* подтвердил правильность квантовых представлений об электромагнитном излучении, и в физику в 1920-х гг. окончательно вошла новая элементарная частица, названная фотоном (от греческого слова, означающего «свет»).

Фотон, как и любая другая квантовая частица, имеет и волновые, и корпускулярные свойства одновременно, так что в затянувшемся почти на два века споре между сторонниками волновой и корпускулярной теорий света все оказались по-своему правы. В обычной жизни корпускулярные свойства света не проявляются, поскольку мы имеем дело с фотонами не поодиночке, а сразу с большим количеством, воспринимаемым как световая волна. Известно, что электромагнитная волна характеризуется круговой частотой ω, интенсивностью и скоростью распространения c, имеющей фундаментальный смысл предельной скорости распространения взаимодействий (современное значение $c = 2{,}99792458 \cdot 10^{10}$ см/с). Соответствующие волне фотоны имеют энергию $E = \hbar\omega$ и импульс $p = \hbar\omega/c$ (современное значение постоянной Планка $\hbar = 1{,}0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж · с). Например, максимум излучения Солнца приходится на свет с длиной волны $\lambda = 4{,}6 \cdot 10^{-5}$ см, чему соответствует круговая частота $\omega = 2\pi c/\lambda = 4{,}1 \cdot 10^{15}$ Гц. Энергия таких фотонов $E = \hbar\omega = 4{,}3 \cdot 10^{-19}$ Дж. Солнечная постоянная, т. е. энергия, падающая в единицу времени на единицу площади земной поверхности, равна 0,14 Дж/см^2·с, откуда можно вычислить, что в 1 с на 1 см^2 падает огромное число фотонов, около $3 \cdot 10^{17}$. В то же время в опытах с элементарными частицами детекторы регистрируют фотоны поодиночке, и даже человеческий глаз в принципе способен на это.

Число фотонов не постоянно, они могут рождаться и уничтожаться в процессах взаимодействия, например в процессе аннигиляции (см. *Антивещество*) : $e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$ (e^-, e^+ — символы электрона и позитрона, γ — символ фотона, гамма-кванта). И здесь и в эффекте Комптона ($e^- + \gamma \to e^- + \gamma$) фотоны выступают как реальные наблюдаемые частицы. Кроме того, фотоны могут существовать в ненаблюдаемом, виртуальном состоянии, перенося электромагнитные взаимодействия.

Свойства *фотона* как *элементарной частицы* уходят своими корнями в классическую *электродинамику*. Фотон электрически нейтрален, его заряд равен нулю. (В противном случае две электромагнитные волны могли бы взаимодействовать друг с другом, а поле двух зарядов уже не являлось бы суммой полей каждого из них в отдельности.) Фотон также не имеет никаких других зарядов: как говорят, он истинно нейтрален и тождествен своей античастице (см. *Антивещество*). Зарядовая *четность* фотона равна -1, что следует из очевидного факта изменения направления электрического и магнитного полей на противоположные при изменении знаков всех зарядов какой-либо системы. Сохранение зарядовой четности в электромагнитных взаимодействиях, связанное с симметрией между *электронами* и их античастицами — позитронами, приводит к определенным ограничениям на реакции. Например, некоторые системы частиц могут распадаться лишь на четное число фотонов, а другие — лишь на нечетное (см. *Антивещество*).

Особенно хорошо изучены процессы взаимодействия фотонов с электронами и позитронами — это так называемая *квантовая электродинамика*, предсказания которой проверены в экспериментах с огромной точностью.

Масса покоя фотона равна нулю. Это означает, что фотон невозможно ни остановить, ни замедлить. Независимо от своей энергии он обречен двигаться с фундаментальной скоростью c. Если предположить наличие у фотона некоторой малой, но все же конечной массы m_γ, то можно исследовать возникающие при этом наблюдаемые эффекты. Как и у обычных частиц, скорость фотонов тогда должна была бы зависеть от их энергии (т. е. от длины волны излучения) и быть всегда меньше c. Эффект *дисперсии* электромагнитных волн в *вакууме* можно было бы в принципе обнаружить по излучению пульсаров. Образно говоря, синие лучи придут к наблюдателю раньше красных. При тех огромных расстояниях, которые отделяют нас от пульсаров, время прибытия должно было бы заметно различаться даже при небольших отличиях в скоростях разных лучей.

Наличие у фотона конечной массы покоя привело бы к появлению конечного радиуса действия электромагнитных сил. В самом деле, если заряд испускает виртуальный фотон, то возникает неопределенность в энергии $\Delta E \simeq \simeq m_\gamma c^2$, и по *соотношению неопределенностей* такой фотон может существовать лишь в течение времени $\Delta t \simeq \hbar/\Delta E \simeq \hbar/m_\gamma c^2$. За это время он пройдет расстояние, не большее $\lambda_\gamma =$

$= \Delta t \cdot c \simeq \hbar / m_\gamma \cdot c$, после чего должен поглотиться другим зарядом. Эффекты конечной массы покоя фотона проявлялись бы, следовательно, на расстояниях, больших или порядка λ_γ. Наблюдения над пульсарами, межпланетными и межгалактическими магнитными полями позволили получить оценку $\lambda_\gamma \gtrsim 10^{22}$ см $\simeq$ 10 тыс. световых лет или $m_\gamma \lesssim 3 \cdot 10^{-60}$ г (для сравнения: масса электрона $m_e \simeq 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ г). Заметим, что если масса фотона по порядку величины меньше 10^{-66} г, то радиус действия электромагнитных сил станет больше видимого радиуса Вселенной ($2 \cdot 10^{28}$ см $\simeq$ 20 млрд. световых лет). Столь малая масса принципиально не обнаружима на опыте, так что для экспериментальных поисков конечной массы покоя фотона остается не такой уж большой интервал от 10^{-60} до 10^{-66} г. Поэтому вполне можно считать ее равной нулю. В квантовой теории поля установлена глубокая связь между этим свойством фотона и законом сохранения электрического заряда.

Фотон — одна из наиболее изученных элементарных частиц с относительно простыми свойствами. Возможно, дальнейшее углубление нашего понимания природы фотона и его роли в микромире произойдет с развитием теорий, объединяющих воедино все виды фундаментальных взаимодействий (см. *Единство сил природы*).

ФОТОЭФФЕКТ

Различают два вида фотоэлектрического эффекта: внешний и внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект заключается в испускании *электронов* с поверхности вещества, на которую падает электромагнитное излучение. Обычно длины волн излучения, вызывающего фотоэффект, лежат в оптическом диапазоне. Внутренний фотоэффект связан с перераспределением электронов атомов по их состояниям в *твердом теле*, при поглощении им электромагнитного излучения.

Начало исследований фотоэффекта было положено в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем. Он установил, что под действием ультрафиолетового излучения электрическая искра между двумя металлическими стержнями — электродами проскакивает при меньшей разности потенциалов, чем в отсутствие облучения. Детально фотоэффект был впервые изучен русским физиком А. Г. Столетовым в 1888 г. Явление, наблюдаемое Столетовым, состояло в том, что из освещенной металлической пластины, помещенной в сосуд, из которого был тщательно откачан воздух, вылетали отрицательно заряженные частицы — электроны (рис. 1).

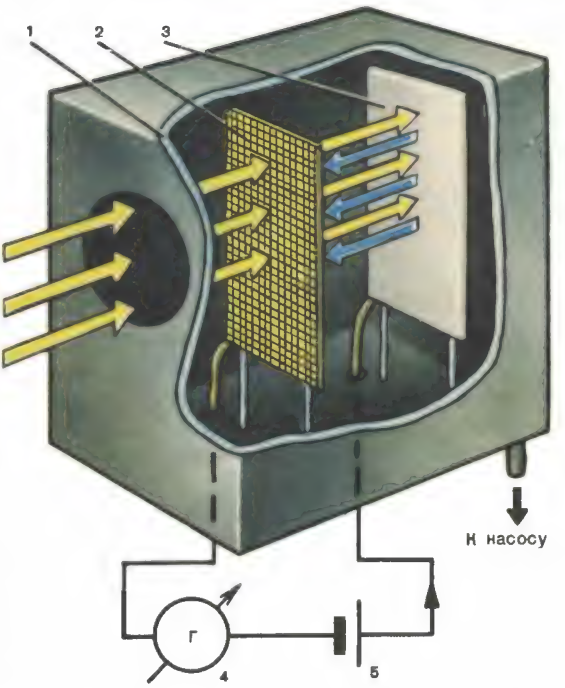


Схема опыта А. Г. Столетова. Рис. 1. *1* — вакуумный объем; *2* — металлическая сетка; *3* — электрод; *4* — гальванометр; *5* — источник напряжения.

В дальнейшем наукой был установлен следующий з а к о н: максимальная скорость вылетающих электронов зависит только от частоты колебаний электромагнитной волны и растет с увеличением частоты. Так, максимальная скорость электронов, покидающих пластину, освещаемую красным светом, оказывается почти вдвое меньше скорости электронов, вылетающих при освещении той же пластины фиолетовым светом. При этом скорости электронов не зависят от освещенности пластины. Такое явление нельзя объяснить, рассматривая

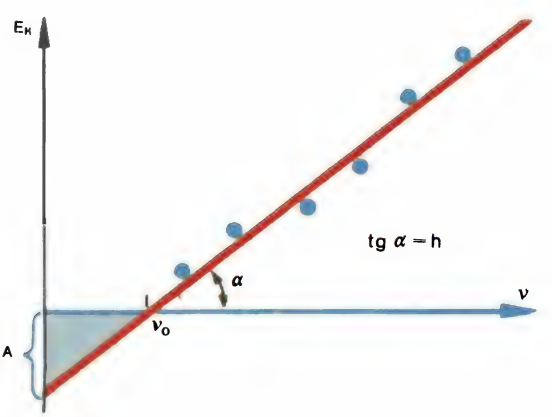


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии $E_к$ электрона от частоты ν падающего на поверхность металла света. ν_0 — частота, при которой электроны начинают выходить из металла, — «красная граница» фотоэффекта.

Рис. 3. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом. На внутренней части его баллона, на катоде нанесен слой вещества с малой работой выхода.

свет как непрерывную электромагнитную волну. В этом случае скорости электронов должны были бы возрастать с увеличением амплитуды волны, т. е. с увеличением освещенности поверхности.

Загадка фотоэффекта сделалась понятной, когда А. Эйнштейн стал рассматривать это явление как взаимодействие потока отдельных световых квантов с энергией $\hbar\nu$ с электронами вещества. Энергия электрона расходуется на работу A, которую нужно затратить, чтобы вырвать электрон из металла, и на придание ему кинетической энергии: $\hbar\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. Здесь ν — частота излучения, m — масса, v — скорость электрона. Постоянную A называют работой выхода (рис. 2). Впервые это уравнение записал А. Эйнштейн, и оно носит его имя. Проверка на опыте полученного соотношения показала, что оно полностью объясняет закономерности фотоэффекта. Удачное объяснение нового явления на основе квантовых представлений послужило дальнейшему развитию *квантовой механики*.

На использовании внешнего фотоэффекта созданы фотоэлементы: устройства, преобразующие световой поток в электрический сигнал (рис. 3). Электрический сигнал, поступающий с фотоэлемента, можно усилить с помощью электронных устройств и использовать для управления какой-либо системой, например турникетом в метро.

В результате перераспределения электронов в объеме полупроводникового материала под действием потока *фотонов* возникают свободные электрические заряды, и его электрическое сопротивление уменьшается. Такие фотоэлементы с внутренним фотоэффектом называются фотосопротивлениями. Под действием электромагнитного излучения они изменяют сопротивление, благодаря чему меняется

АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ СТОЛЕТОВ (1839 — 1896)

Русский физик Александр Григорьевич Столетов родился в городе Владимире, в купеческой семье. После окончания Московского университета (1860) он был оставлен там для подготовки к преподавательской деятельности.

В 1862 г. Столетов отправился на три года в Германию, где стажировался у видных ученых Г. Кирхгофа, Г. Магнуса, В. Вебера.

С 1866 г. А. Г. Столетов — преподаватель Московского университета, а затем профессор.

Свои научные исследования ученый посвятил проблемам электричества и магнетизма. В работе «Исследование о функции намагничения мягкого железа» (1872) он доказал, что кривая зависимости магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля имеет максимум. С помощью измерений отношения электромагнитных и электростатических единиц ему удалось получить значение, близкое к значению скорости света. Эти исследования, которые он провел еще до опытов немецкого физика Г. Герца, способствовали утверждению электромагнитной теории света.

Мировую известность Столетову принесли исследования внешнего *фотоэффекта*. Создав оригинальную схему опытов, ученый открыл первый закон фотоэффекта: сила фототока прямо пропорциональна интенсивности падающего света. Он указал на возможность применения фотоэффекта для *фотометрии*, изобрел простую конструкцию первого фотоэлемента, обнаружил зависимость фототока от частоты падающего света. Изучая зависимость фототока от давления газа, Столетов установил, что отношение напряженности электрического поля к давлению газа при максимальном токе есть величина постоянная. Этим он внес большой вклад в теорию несамостоятельного газового разряда (см. *Электрический разряд в газах*).

Много сил и труда А. Г. Столетов отдавал научно-организаторской и педагогической работе. Он был инициатором создания физической лаборатории и физического института Московского университета. Столетов и его ученики подняли на новый уровень преподавание физики и исследовательскую работу в России.

ток в их цепи. Фотосопротивления в отличие от фотоэлементов с внешним фотоэффектом могут реагировать на инфракрасное длинноволновое излучение. С их помощью измеряют распределение температуры слабо нагретых тел. Специальные приборы позволяют, например, снять карту температуры поверхности человеческого тела и по распределению температуры проконтролировать здоровье человека.

Солнечные батареи обеспечивают энергией летательные космические корабли. Они составлены из множества фотодиодов, преобразующих свет в электрическую энергию. Фотодиод — кристалл *полупроводника,* одна часть которого имеет электронную, а другая — дырочную проводимость. Между этими частями возникает *p—n*-переход. При освещении фотодиода один его электрод заряжается положительно, а другой — отрицательно. Если между электродами включить резистор, то через него потечет ток. Современные фотодиоды только незначительную долю падающей на них энергии преобразуют в электрический ток. Однако в перспективе, как считают ученые, будут разработаны фотодиоды с большим КПД, почти полностью преобразующие поглощаемую ими световую энергию в энергию электрического тока.

ЦЕНТР МАСС

Представим себе два груза массами m_1 и m_2, соединенные легким стержнем так, что расстояние между ними равно r (рис. 1). Такие грузы уже не могут вести себя независимо — они образуют единую систему. Если приложить внешнюю силу к грузу m_1, то будет ускоряться и груз m_2, и наоборот. Как описывать лучше всего движение такой системы?

Оказывается, что имеется одна особая точка, которая движется так, как если бы в ней была сосредоточена вся масса системы и приложены все внешние силы (внутренние силы можно не учитывать, так как их векторная сумма по третьему закону Ньютона равна нулю). Если, например, подбросить грузики в поле тяжести, то они будут кувыркаться, но одна точка системы будет двигаться, как и положено, по параболе. Эта точка называется *центром масс.* Она имеется у любой, даже самой сложной, системы.

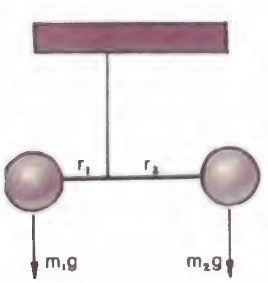


Рис. 1. Определение центра масс стержня с грузами.

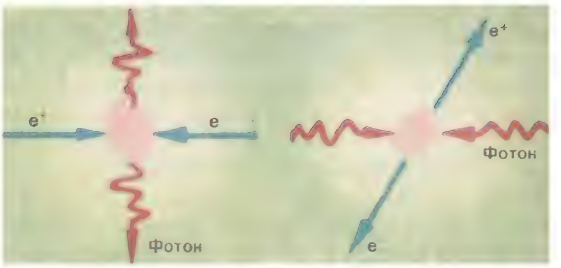


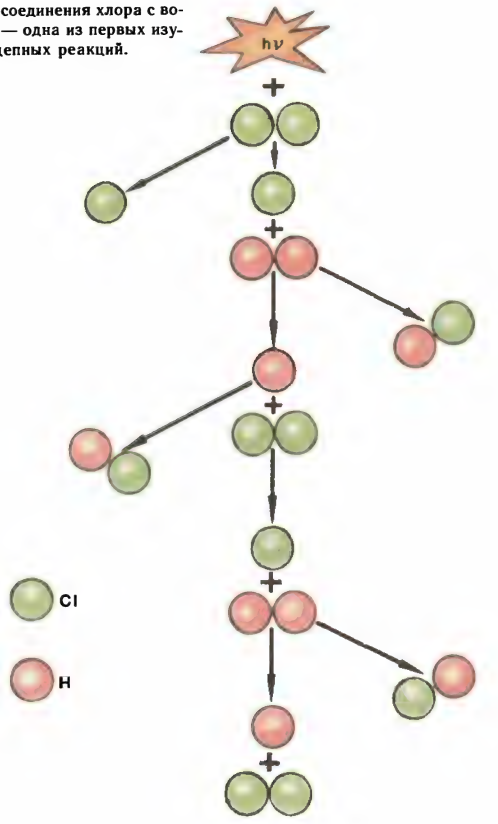
Рис. 2. Рождение электрон-позитронной пары и аннигиляция в системе центра масс.

Как найти положение центра масс? Если подвесить стержень с грузами, то при определенном выборе точки подвеса стержень будет оставаться в равновесии в горизонтальном положении. Для этого должно выполняться условие $m_1r_1 = m_2r_2$, так чтобы моменты сил тяжести относительно точки подвеса были бы равны. С другой стороны, так как, по определению, можно считать, что в центре масс сосредоточена вся масса системы, то и равнодействующая сил тяжести должна проходить через центр масс (поэтому его также называют центром тяжести системы). Следовательно, в равновесии, когда нет вращения, центр масс должен совпадать с точкой подвеса. Конечно, положение центра масс не обязательно находить экспериментально. Его можно рассчитать, используя указанную выше формулу: центр масс находится на линии, соединяющей грузы на расстоянии $r_1 = rm_2/(m_1 + m_2)$ от груза m_1 или на расстоянии $r_2 = rm_1/(m_1 + m_2)$ от груза m_2. Если имеется много грузиков, то последовательно разбивая систему на пары, можно найти положение центра масс всей системы.

Итак, центр масс позволяет описать крупномасштабное движение системы под действием внешних сил, отвлекаясь от деталей внутреннего движения. В частности, если на тело не действуют внешние силы (или их векторная сумма равна нулю), то центр масс должен двигаться с постоянной скоростью. Если он вначале покоился, то его смещение будет равно нулю. Центр масс изолированной системы остается на месте. Вот почему нельзя разбежаться по очень скользкому льду, улететь на ракете, не выбрасывая назад топливо, и т. д. Это свойство отражает очень важный закон природы — закон сохранения *импульса.*

С другой стороны, если нас интересуют внутренние процессы в системе, то, для того чтобы отвлечься от ее движения как целого, можно перейти в систему отсчета, связанную с центром масс (система центра масс). Для изолированной системы центр масс движется с постоянной скоростью, и такая система будет инерциальной.

Известно, например, что γ-кванты могут рождать пары частиц: *электрон* и позитрон. Но оказывается, что этот процесс не может происходить с одним квантом. Для того чтобы в этом убедиться, воспользуемся системой центра масс. В этой системе суммарный импульс электрона и позитрона равен нулю (так как массы частиц одинаковы, то центр масс всегда находится посередине, и относительно него частицы разлетаются с одинаковыми по величине скоростями в разные стороны). В то же время импульс γ-кванта, из которого родились частицы, был отличен от нуля, так как в любой системе отсчета он движется со скоростью света. Поэтому закон сохранения импульса запрещает такой процесс. Он может идти, например, при столкновении двух γ-квантов или когда есть еще и другие частицы, которым передается лишний импульс. Аналогично при аннигиляции рождаются два γ-кванта (рис. 2). Как видно, в системе центра масс удобно исследовать процессы взаимодействия частиц, и такую систему часто используют в *ядерной физике* и физике *элементарных частиц*.



Реакция соединения хлора с водородом — одна из первых изученных цепных реакций.

ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ

Понятие о цепных реакциях зародилось в химии. В 1913 г. немецкий ученый М. Боденштейн изучал фотохимические реакции. Он обнаружил, что в смеси водорода и хлора всего лишь один поглощенный световой квант вызывает образование до 10^6 молекул HCl, и назвал подобные реакции цепными. Их стали изучать многие химики в разных странах. Теорию цепных реакций разработали в конце 20-х — начале 30-х гг. советский физико-химик Н. Н. Семенов и английский ученый С. Хиншелвуд, удостоенные за это Нобелевской премии.

Рассмотрим механизм цепных реакций на примере образования молекул хлористого водорода. Квант света расщепляет *молекулу* хлора на атомы ($Cl_2 \xrightarrow{h\nu} Cl + Cl$), которые обладают гораздо большей химической активностью, чем молекулы. Атомы хлора, в свою очередь, взаимодействуют с молекулами водорода с образованием молекулы HCl и атомарного водорода ($Cl + H_2 \rightarrow HCl + H$). Последний возбуждает другую молекулу хлора ($H + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl$). Новый активный атом хлора начинает новое звено цепной реакции. Она будет продолжаться до тех пор, пока цепь по тем или иным причинам не оборвется.

Представление о ядерных цепных реакциях, вообще говоря, появилось раньше, чем было открыто явление деления урана под действием медленных *нейтронов*. В 1934 г. американский физик Л. Сцилард высказал идею, что ядерная реакция $^{9}_{4}Be\ (n,\ 2n)\ ^{8}_{4}Be \rightarrow 2\,^{4}_{2}He$ будет носить цепной характер, поскольку на один бомбардирующий нейтрон приходится два высвобождающихся нейтрона, каждый из которых может положить начало двум новым аналогичным ядерным реакциям, сопровождающимся выделением большой энергии. Однако практическое осуществление этого процесса оказалось нереальным.

После открытия деления урана французский ученый Ф. Жолио-Кюри установил, что при каждом акте деления вылетают 2—3 быстрых нейтрона. Любой из них способен вызвать деление новых ядер, в результате чего освобождаются новые свободные нейтроны. Процесс принимает цепной характер и мгновенно распространяется по всей массе материала, способного к делению. Происходит атомный взрыв (см. *Деление атомных ядер*). Главное условие взрыва состоит в том, чтобы делящееся вещество имело определенную критическую массу, сконцентрированную в небольшой области пространства. Иначе цепная реакция затухает, так как большая часть нейтронов из-за значительных расстояний между ядрами не попадает в цель и покидает зону деления. Для чистого *изотопа* урана-235 критическая масса равна примерно 1 кг и занимает объем около 45 $см^3$. Она уменьшается для более тяжелых делящихся ядер (плутония, калифорния и т. д.). Если масса меньше критической, цепная реакция невозможна.

Управляемые цепные *ядерные реакции* осуществляются в ядерных реакторах. В них используются не чистые изотопы, а их смеси, например природный уран, обогащенный (до 5%) изотопом урана-235, и с помощью специальных поглотителей нейтронов число делений в единице объема в единицу времени поддерживается на заданном уровне, не приводящем к перегреву и разрушению реактора.

Теория цепных ядерных реакций была разработана в 1939—1940 гг. советскими учеными Ю. Б. Харитоном и Я. Б. Зельдовичем. Интересно отметить, что оба исследователя внесли большой вклад в изучение цепных химических реакций.

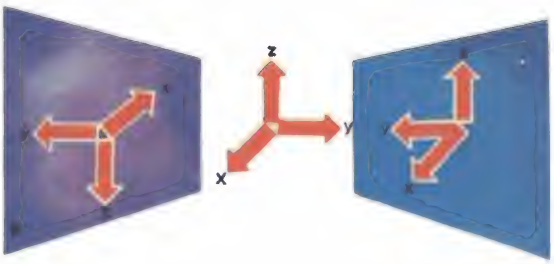
В свое время была высказана гипотеза о возможном существовании в далеком прошлом естественных ядерных реакторов. Она подтвердилась в начале 70-х гг., когда на урановом руднике Окло (Габон, Африка) действительно были обнаружены следы действия около 2 млрд. лет назад природного ядерного реактора. Этот вывод основывался на том, что содержание урана-235 в богатых урановых рудах названного рудника оказалось заметно пониженным (0,3 вместо 0,7%). Ученые считают, что подобные естественные урановые реакторы могут в настоящее время работать на значительных глубинах в земной коре.

ЧЕТНОСТЬ

Четность — квантовое число, характеризующее поведение системы (*атома, атомного ядра, адрона, элементарной частицы*) при зеркальном отражении. В статье *Симметрия законов природы* рассказывается о симметриях, имеющих геометрическую природу. Так, насколько известно, наше *пространство* однородно и изотропно, т. е. в нем нет какой-либо выделенной точки и какого-нибудь выделенного направления, но все они равноправны. Можно перенести любую замкнутую физическую систему в произвольную точку пространства или повернуть ее на любой угол, но ни к каким физическим последствиям это не приведет: законы физики не меняются при таких преобразованиях. В каждом таком случае существует сохраняющаяся величина, связанная с данным типом симметрии: геометрическим симметриям соответствуют фундаментальные *законы сохранения энергии, импульса* и момента количества движения. Геометрические преобразования можно делать плавно, они имеют непрерывный характер.

Кроме непрерывных преобразований существуют дискретные, которые нельзя выполнить плавно. В самом деле, мы можем «чуть-чуть» повернуть систему на какой-то угол, но нельзя лишь «чуть-чуть» отразить ее в зеркале. Среди дискретных преобразований наиболее важную роль играют операции P, C и T.

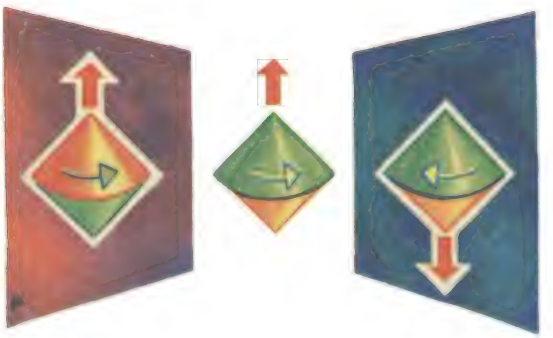
Преобразования полярных векторов при операциях отражения. *Справа* — обыкновенное зеркало, изменяющее направление лишь одной оси (y), перпендикулярной к его плоскости. Если при этом осуществить поворот на 180° вокруг оси y, то получим операцию пространственного отражения P, изменяющую направления всех трех координатных осей (и всех полярных векторов). *Слева* — воображаемое P-зеркало, осуществляющее эту операцию.



Операция P (наименована первой буквой английского слова, означающего «четность») состоит в зеркальном отражении относительно точки, т. е. в одновременном отражении относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей, проходящих через начало координат. Легко понять, что, когда мы смотрим в обычное зеркало, направление меняет лишь одна из координатных осей, направленная перпендикулярно плоскости зеркала. Но если, кроме того, повернуть систему координат вокруг этой оси на 180°, получится операция P.

Долгое время ученым казалось естественной идея симметрии физических законов относительно зеркального отражения. Опыты также подтверждали, что мир «зазеркалья» ничем не отличается от нашего мира. Как правило, с этой симметрией связывалась сохраняющаяся величина — пространственная четность. Квантовая система (см. *Квантовая*

Героиня книги Л. Кэрролла «Алиса в Стране Чудес» в Зазеркалье: *справа* — в обычном, *слева* — в P-Зазеркалье. Обратите внимание на положение рук девочки. Операция пространственного отражения приводит к замене правого на левое, как в обычном зеркале.



Вращение тела описывается вектором его угловой скорости, направление которого определяется «правилом буравчика». При операции P такие аксиальные векторы не изменяют направления: изображение вектора угловой скорости в P-зеркале имеет то же направление, что и его оригинал.

механика) описывается волновой функцией $\Psi(x)$. Все наблюдаемые величины определяются модулем волновой функции. Частица, скажем пи-мезон, рассматриваемая в зеркале, должна оставаться тем же π-мезоном (см. *Адроны*). Иными словами, ее волновая функция при операции отражения P может изменяться лишь на несущественный множитель $P\Psi = \eta\Psi$. Операция P, повторенная дважды, возвращает систему в исходное состояние, откуда следует, что множитель η может принимать только значение ± 1:

$$P^2\Psi = P(P\Psi) = P(\eta\Psi) = \eta^2\Psi = \Psi, \eta = \pm 1.$$

Таким образом, частице можно приписать определенную (положительную или отрицательную: $\eta = +1$ или $\eta = -1$) внутреннюю четность.

Многие годы справедливость симметрии законов природы относительно операции зеркального отражения не подвергалась сомнению. Конечно, были известны различия между правым и левым на макроскопическом уровне (достаточно напомнить здесь о разнице между правой и левой рукой, полушариями мозга, молекулами ДНК — дезоксирибонуклеиновой кислоты и т. п.). Однако наблюдаемая асимметрия относилась на счет каких-то различий в начальных условиях, поскольку на микроуровне все свойства частиц выглядели симметричными.

В 1956 г. китайские физики Ли Цзун-дао и Ян Чжэнь-нин проанализировали ситуацию и выяснили, что сохранение пространственной четности подтверждено в экспериментах только для *сильного* и электромагнитного *взаимодействий*. Было высказано предположение, что в слабых взаимодействиях четность не сохраняется. И уже в 1957 г. Ву Цзянь-сюн экспериментально подтвердила это предположение, открыв со своими сотрудниками в опытах эффект несохранения четности при *бета-распаде*.

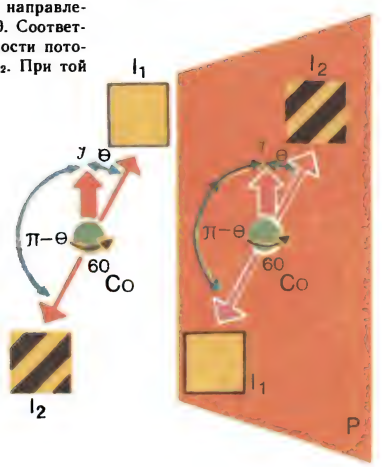
Для того чтобы понять эти опыты, представим себе, что происходит с векторами при зеркальном отражении. Очевидно, координаты частиц меняют при этом знак: $\vec{x} \xrightarrow{P} -\vec{x}$. Ясно, что то же самое произойдет со скоростью частиц, а значит, и с их импульсом. Векторы, меняющие знак при зеркальном отражении, называются полярными. Но существуют и так называемые аксиальные векторы, не меняющиеся при действии операции P. К ним относятся векторы, так или иначе связанные с вращением: угловая скорость, момент количества движения, *спин*.

Теперь снова вернемся к опыту Ву Цзянь-сюн, в котором измерялась интенсивность потока электронов, испущенных при бета-распаде ядер кобальта: $^{60}\mathrm{Co} \to {}^{60}\mathrm{Ni} + e^- + \tilde{\nu}_e$. Использовались ядра кобальта в поляризованном состоянии со спином, направленным вдоль оси z. Существует некоторая вероятность того, что *электрон* вылетит по направлению спина ядра. При зеркальном отражении импульс электрона меняет знак, т. е. он вылетает против направления спина ядра. Если законы природы симметричны относительно операции P, то вероятность обоих процессов будет одинаковой. На опыте же выяснилось, что интенсивность потока электронов, испущенных по спину ядра, меньше интенсивности потока электронов, летящих в противоположном направлении.

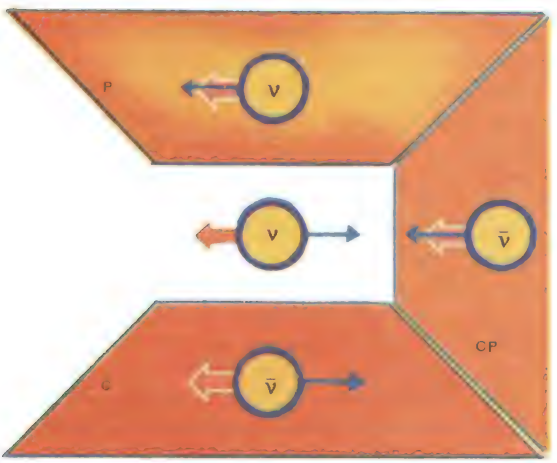
Эффекты несохранения четности выступают особенно наглядно в слабых процессах с испусканием нейтрино (см. *Нейтрино, Лептоны*). Дело в том, что нейтрино — очень своеобразные частицы, так как их масса очень мала, а возможно, вообще равна нулю, и нейтрино практически всегда находятся в движении со скоростью, близкой к скорости света,— почти как *фотоны*. Оказывается, что у нейтрино спин всегда направлен против импульса, а у антинейтрино — по импульсу. Говорят, что нейтрино — частица с «левой спиральностью», т. е. напоминает винт с левой резьбой. А ее античастица обладает «правой спиральностью» (винт с правой резьбой). Все это было установлено в экспериментах по определению спиральности нейтрино, испускаемых в β-распаде и в распаде $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$. Теперь ясно, что зеркальным изображением процесса с испусканием нейтрино будет процесс с испусканием не существующей в природе частицы — нейтрино со спином, направленным по импульсу (нейтрино с правой спиральностью). Другими словами, зеркального процесса в природе просто нет (или, по крайней мере, он очень сильно подавлен).

Одновременно с открытием несохранения четности оказалась опровергнутой и другая, казалось бы, точная симметрия природы относительно операции зарядового сопряжения C (названа по первой букве английского слова, означающего «заряд»). При операции C частицы заменяются на античастицы, т. е. меняют знаки все заряды. Истинно нейтральным частицам, для которых все заряды равны

Схема опыта Ву Цзянь-сюн. Один детектор регистрировал электроны, испускаемые ядрами кобальта под углом θ к направлению спина ядра J, второй — электроны, вылетающие в противоположном направлении под углом $\pi - \theta$. Соответствующие интенсивности потока электронов I_1 и I_2. При той же ситуации в P-зеркале спин ядра сохранил свое направление, а импульсы электронов (и все полярные векторы) изменили направления на противоположные.



Опыты показывают, что спин нейтрино всегда направлен против импульса (нейтрино имеет левую спиральность), а спин антинейтрино параллелен импульсу (правая спиральность). Изображением нейтрино в P-зеркале (*вверху*) является нейтрино с правой спиральностью. Отражение нейтрино в воображаемом C-зеркале (*внизу*) — это антинейтрино с левой спиральностью. Таким образом, зеркала P и C приводят к не существующим в природе объектам. В то же время зеркало, одновременно осуществляющее обе эти операции, переводит левое нейтрино в правое антинейтрино (см. *справа*). Обе эти частицы существуют в природе.



нулю и которые совпадают поэтому со своими античастицами (фотон, π^0-мезон и т. п.), можно приписать определенную зарядовую четность: их волновые функции при операции C приобретают множитель ± 1 (рассуждения здесь такие же, как в случае пространственной четности). Сохранение зарядовой четности сильными и электромагнитными взаимодействиями приводит к определенным ограничениям на реакции распада элементарных частиц.

Открытие в 1950-х гг. нарушения P-симметрии произвело на физиков большое впечатление, поскольку оно означало асимметрию *пространства* по отношению к зеркальному отражению, что представлялось тогда весьма странным. Казалось, выход был найден на пути рассмотрения комбинированной операции CP, при которой одновременно заменяются правое на левое и частицы на античастицы. Зеркальное отражение, сопровождающееся заменой всех частиц на античастицы, советский ученый Л. Д. Ландау назвал комбинированной инверсией. Ученые предпринимали попытки сохранить симметрию пространства, а всю асимметрию перенести на электрические и прочие заряды. Например, операция CP переводит *нейтрино* с противоположным спином и импульсом в реально существующее антинейтрино с параллельным спином и импульсом. По такой теории, мир, потеряв симметрию относительно C- и P-операций по отдельности, оставался CP-симметричным. Античастицы, выражаясь наглядно, стали рассматриваться как зарядово сопряженные частицы, отраженные в зеркале.

В 1964 г. Дж. Кронин и В. Фитч обнаружили в опытах по распадам нейтральных K^0-мезонов эффект нарушения симметрии относительно комбинированного отражения CP. В этих опытах наблюдались распады так называемого долгоживущего K-мезона (CP-четность которого отрицательна) на два π-мезона (четность этой системы положительна). До сих пор не ясно, какое взаимодействие ответственно за нарушение CP-симметрии. Попытки обнаружить этот эффект в иных системах, нежели нейтральные K-мезоны, результата пока не дали. Решение вопроса о причинах CP-нарушения имеет фундаментальное значение. В последнее время в науке все больше укрепляется мнение, что благодаря нарушению CP-симметрии произошло разделение вещества и антивещества во Вселенной, а без этого была бы невозможна не только разумная жизнь, но и существование планет, звезд и галактик.

CP-симметрия тесно связана с третьей дискретной симметрией относительно операции T. Операция T (название произошло от первой буквы английского слова, означающего «время») состоит в замене знака *времени* на обратный $t \xrightarrow{T} -t$ во всех уравнениях движения рассматриваемой системы. Симметрия относительно операции T означает, что для любого возможного движения системы возможно и обратное, обращенное во времени движение, при котором система проходит те же состояния, но в обратном порядке. На макроскопическом уровне такая симметрия отсутствует: например, люди с возрастом, увы, не молодеют. Но на уровне простых физических систем T-симметрия не вызывала сомнений. Открытие нарушения CP-симметрии почти автоматически означало и нарушение симметрии относительно обращения времени. Дело в том, что из самых общих принципов квантовой теории следует точная симметрия физических законов относительно совместного действия всех трех операций CPT.

Э

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

Физика — экспериментальная наука. В трудах Галилея, Ньютона и других исследователей утвердился ее основной метод: любое предсказание теории должно быть подтверждено опытом. В XVII, XVIII и даже XIX вв. одни и те же люди и проводили теоретический анализ, и сами проверяли свои выводы на опыте. Но в XX в. стремительное накопление знаний, развитие техники, все, что носит название научно-технической революции, привели к тому, что одному человеку стало не под силу и создавать теории, и ставить эксперименты.

Произошло разделение физиков на теоретиков и экспериментаторов (см. *Теоретическая физика*). Конечно, нет правил без исключений, и иногда теоретики ставят опыты, а экспериментаторы занимаются теорией. Но с каждым годом таких исключений становится все меньше.

Сейчас в руках экспериментаторов имеется сложная и мощная техника: ускорители, ядерные реакторы, техника сверхвысокого вакуума, глубокого охлаждения и, конечно, электроника. Она совершенно преобразила возможности опыта, и это можно проиллюстрировать на таком примере.

В начале нашего века Э. Резерфорд и его сотрудники регистрировали в своих экспериментах альфа-частицы с помощью экрана из сернистого цинка и микроскопа (см. *Ядро атомное*). При попадании каждой частицы на экран последний давал слабую вспышку света, которую можно было разглядеть в микроскоп. Перед началом опыта исследователям приходилось часами сидеть в темноте для обострения чувствительности глаз. Максимальное число импульсов, которое удавалось сосчитать,— было два-три в секунду. Через несколько минут глаза уставали.

А сейчас специальные электронные приборы — фотоумножители — в состоянии различить и превратить в электрические импульсы гораздо более слабые световые вспышки. Они успевают сосчитать десятки и сотни тысяч импульсов в секунду. И не только сосчитать. Специальные схемы, используя форму электрического импульса (повторяющего световой), дают информацию об энергии, заряде, даже о типе частицы. Эта информация запоминается и обрабатывается быстродействующими вычислительными машинами.

Следует отметить, что у экспериментальной физики двоякие отношения с техникой. С одной стороны, физика, открывая неизвестные еще области, такие, как электричество, атомная энергия, *лазеры*, постепенно осваивает их и передает в руки инженеров. С другой стороны, после того как техника создала соответствующие приборы и даже новые отрасли промышленности, экспериментальная физика начинает использовать эти приборы при постановке опытов. И это позволяет ей все глубже проникать в тайны *материи*.

Современные средства проведения эксперимента требуют участия уже целого коллектива экспериментаторов.

Экспериментальное исследование можно условно разбить на три части: подготовка, измерение, обработка разультатов.

Когда рождается идея опыта, на повестку дня становится возможность его осуществления, создания новой установки или переделки старой. На этой стадии необходимо проявить максимальную предусмотрительность.

«Я всегда придавал очень большое значение тому, как был задуман и поставлен опыт. Конечно, надо исходить из определенной, заранее продуманной идеи; но каждый раз, когда это только возможно, опыт должен оставлять максимальное число открытых окон для того, чтобы можно было наблюдать непредусмотренное явление»,— писал выдающийся французский физик Ф. Жолио-Кюри.

При конструировании и изготовлении установки на помощь эскпериментатору приходят специализированные конструкторские бюро, мастерские, иногда и большие заводы. Широко используются готовые приборы и блоки. Тем не менее на долю физиков выпадает самая ответственная работа: создание тех узлов, которые являются уникальными и которые порой никогда и нигде еще не применялись. Поэтому выдающиеся физики-экспериментаторы всегда были и очень хорошими инженерами.

Когда установка собрана, приходит время проведения контрольных экспериментов. Их результаты служат для проверки работоспособности аппаратуры и снятия ее характеристик.

А потом начинаются основные измерения, которые иногда могут продолжаться очень долго. Своеобразный рекорд был поставлен при регистрации солнечных *нейтрино* — измерения продолжались 15 лет.

Обработка результатов тоже далеко не простое дело. Существуют области экспериментальной физики, в которых на обработке сосредоточен центр тяжести всего опыта, например на обработке снимков, полученных в пузырьковой камере. Камеры установлены на пути пучков крупнейших в мире ускорителей. В них на следе пролетевшей частицы образуется цепочка пузырьков. След становится видным и может быть сфотографирован. Камера «выда-

Экспериментальная термоядерная установка — один из инструментов современной науки.

В Институте теплофизики Сибирского отделения Академии наук СССР занимаются исследованиями плазмы.

ет» десятки тысяч фотографий в сутки. Еще недавно (сейчас и здесь на помощь пришла автоматика) сотни лаборантов сидели у просмотровых столиков за проекционными микроскопами, производя первичный отбор фотографий. Затем в действие вступали автоматизированные установки и ЭВМ. И уже после всего этого исследователи получали нужную информацию, могли строить графики, производить расчеты.

Советским экспериментаторам есть чем гордиться. Перед революцией в России насчитывалось всего несколько десятков серьезно работающих физиков. Большинство из них проводили исследования в неприспособленных помещениях и с самодельными приборами. Поэтому открытия мирового класса, сделанные П. Н. Лебедевым (*давление света*), А. Г. Столетовым (исследования *фотоэффекта*), можно назвать настоящим подвигом.

Наша экспериментальная физика была заложена в трудных условиях первых лет Советской власти. Она создавалась усилиями таких ученых, как А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилов и ряд других. Они были экспериментаторами, учителями, организаторами науки. Их ученики и ученики их учеников прославили отечественную физику. Излучение Вавилова — Черенкова (см. *Вавилова — Черенкова эффект*), *сверхтекучесть*, комбинационное рассеяние света, *лазеры* — перечисление только крупнейших открытий советских ученых может занять много страниц.

Развитие экспериментальной физики не похоже на гладкую и накатанную дорогу. Трудом многих людей накапливаются наблюдения, производятся опыты и расчеты. Но вот рано или поздно постепенный рост наших знаний претерпевает резкий скачок. Происходит открытие. Многое из того, к чему все так привыкли, представляется совсем в ином свете. И надо дополнять, переделывать, иногда создавать заново теорию, спешно производить новые эксперименты.

Поэтому многие выдающиеся ученые сравнивали путь науки с дорогой в горах. Она идет далеко не по прямой, заставляет путников подниматься по крутым склонам, иногда отступать назад, чтобы в конце концов достигнуть вершины. И тогда с побежденной высоты открываются новые вершины и новые пути.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ

Молния, когда за малые доли секунды протекают громадные токи, а на их пути возникают высокое давление и ударные волны; яркий свет электросварочного аппарата; привычный нам свет неоновых реклам; шипение и потрескивание вблизи опор высоковольтных линий — все это явления, сопровождающие различные типы газового разряда.

В «рекламной» неоновой трубке протекает т л е ю щ и й р а з р я д. Напряжение на ее электродах порядка 1000 В, а давление неона

Одно из наиболее впечатляющих зрелищ — электрический разряд в газах. Когда-то он порождал у людей чувство страха (молния!), поражал воображение своей загадочностью («огни святого Эльма» на верхушках мачт кораблей). В наши дни разряд в газах превратился в активного труженика. Он трудится в лампах дневного света, лазерах, сва-

5—7 мм рт. ст. Электрический ток разряда переносит *электроны* и положительные ионы, рождающиеся при столкновении быстрых электронов с нейтральными атомами. Электроны ускоряются в области катода (рис. 1). Чтобы ионизировать нейтральный атом, электрон должен обладать необходимой для этого энергией. Если путь электрона между двумя последовательными столкновениями с молекулами газа достаточно велик, то энергия электрона оказывается достаточной для *ионизации* газа. Это условие выполняется при малом давлении. Положительные ионы движутся к катоду и, в свою очередь, выбивают из него электроны. Таким образом, тлеющий разряд оказывается самостоятельным — ток через газ протекает без внешних ионизаторов.

Между электродами сварочного аппарата протекает другой тип разряда — дуговой. Его ослепительное свечение вспыхивает между электродами, если их удалять друг от друга, когда они подключены к мощному источнику тока. Нагретый светящийся газ «провисает» между горизонтальными электродами. По этой причине русский ученый В. В. Петров, впервые изучивший это явление еще в 1802 г., назвал его электрической дугой.

Сила тока в дуге достигает десятков тысяч ампер, а напряжение между электродами равно нескольким десяткам вольт. Высокая проводимость между электродами дуги поддерживается потоком электронов, испускаемых нагретым катодом, и термической ионизацией газа — при высокой температуре атомы, сталкиваясь друг с другом, теряют электроны и становятся носителями электрического тока. Дуговой разряд используется не только в электросварке. Он горит в ртутных лампах высокого давления — самых ярких источниках света, после *лазеров* и импульсных ламп.

В молнии, во вспышке импульсной лампы и многих других процессах, когда через газовый промежуток протекает за короткое время огра-

рочных аппаратах, различных видах современных измерительных приборов (ионизационных камерах, газовых счетчиках частиц, искровых вольтметрах).

ниченное количество электричества, происходит искровой разряд. В этом процессе напряженность электрического поля достигает пробивного значения $E_{пр}$ для данного газа. Значение $E_{пр}$ для воздуха при атмосферном давлении и температуре 20°С около 30 кВ/ см. Искровой пробой развивается поэтапно. Вначале в объеме газа образуется стример — сильно ионизированный проводящий канал, возникающий из отдельных электронных лавин (рис. 2). Свободный электрон, появившийся в газе, например, в результате фотоионизации, если напряженность электрического поля E достаточно высока, успевает ускориться до энергии, достаточной для ионизации атомов на пути, меньшем его длины свободного пробега — среднего расстояния между последовательными соударениями электрона с атомами газа. В этом случае рождается лавина электронов и ионизированных атомов. Отдельные лавины перекрывают друг друга, и образуется стример. У молнии размеры стримера достигают 10 км по длине и 40 см по диаметру. При атмосферном давлении воздуха между шаровыми электродами искровой разряд происходит при определенной напряженности электрического поля (рис. 3). На этом принципе основан высоковольтный искровой вольтметр, который используют при измерении напряжений в несколько миллионов вольт.

Для коронного разряда характерны возбуждение и ионизация газовых молекул вблизи электродов с малыми радиусами кри-

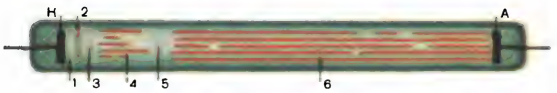


Рис. 1. Зоны тлеющего разряда в неоновой трубке. Темные пространства: *1* — астоново; *3* — катодное; *5* — фарадеево. Светящиеся области: *2* — катодная пленка; *4* — тлеющее свечение; *6* — положительный столб. *К* — катод; *А* — анод.

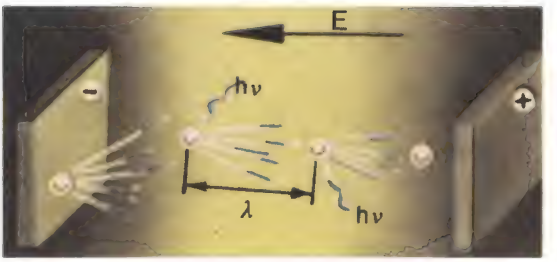


Рис. 2. Возникновение искрового разряда. На длине свободного пробега электрон набирает энергию, достаточную для ионизацни атома (или молекулы), — возникает лавина. Перекрываясь, лавины образуют стример — канал искрового разряда.

визны. Здесь напряженность электрического поля достигает величины $E_{пр}$, и газ светится, образуя «корону», окружающую электрод. Коронный разряд — основной источник потерь энергии высоковольтных линий электропередачи. Потери ограничивают до допустимого предела, избегая острых углов, малых радиусов у тонконесущих элементов.

Для процессов *термоядерного синтеза*, получения интенсивных токов многозарядных ионов,

ОПЫТЫ С НЕОНОВОЙ ЛАМПОЧКОЙ

Среди других приборов, в которых используется тлеющий разряд, наиболее пригодна для опытов в домашних условиях неоновая лампочка, например, типа ТН-02—2.

Вот ее основные характеристики: напряжение, при котором вспыхивает разряд, — не более 85 В, наибольший рабочий ток — 0,25 мА. На рис. 1 показан внешний вид такой лампочки и ее условное изображение на схемах.

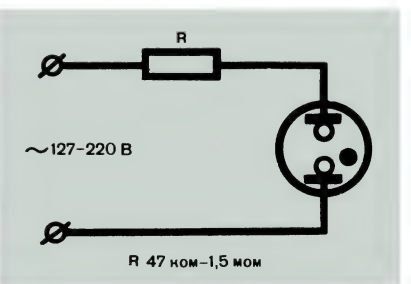
При включении в цепь постоянного тока корпус цоколя соедините с положительным полюсом источника тока, а его нижний конец — с отрицательным.

Прежде чем приступать к более сложным опытам, сделайте два очень простых. Возьмите расческу и несколько раз энергично проведите ею по волосам. Теперь, держа лампочку одной рукой за цоколь, прикоснитесь к нижнему ее концу расческой. На очень короткое время в ней вспыхнет разряд. Если натереть шерстью эбонитовую палочку, то можно провести нижним выводом лампочки вдоль нее, и разряд будет вспыхивать несколько раз.

Второй из простых опытов — изготовление пробника. В нем загорев-

шаяся лампочка покажет, что к розетке подведено напряжение. Схема такого пробника приведена на рис. 2. Сопротивление *R* должно быть 47 кОм ÷ 1,5 мОм, чтобы обеспечить нужный ток в цепи. Когда вы включите пробник и лампочка загорится, рассмотрите более внимательно пространство между ее электродами. Цвет свечения зависит от состава газа в лампочке и может быть красным или красно-оранжевым. Оно распространено между электродами неравномерно — хорошо виден слой светящегося газа около катода лампы. Меняя сопротивление в указанных выше пределах, можно видеть изменение яркости свечения.

После простых опытов можно приступить к изучению некоторых характеристик лампочки. Для этого необходимо собрать схему, изображенную на рис. 3. К точкам *А* и *В* подключается источник постоянного напряжения небольшой мощности. Это могут быть соединенные последовательно батареи, промышленный или само-



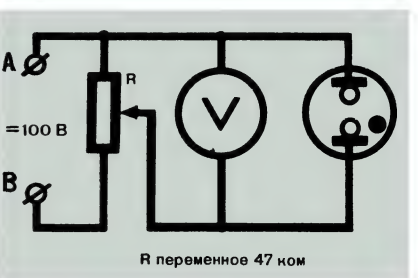
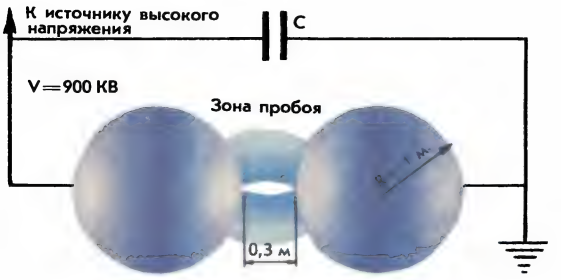


Рис. 3. Искровой вольтметр. Чем выше измеряемое напряжение, тем больше и тем с большим радиусом используются шары.



рядом называют прохождение электрического тока через газы. Здесь рассказывалось о видах самостоятельного газового разряда, когда носители электрического тока рождаются под действием электрического поля. Если же ток в газе переносят носители, образовавшиеся благодаря внешнему воздействию, например электромагнитному ионизирующему излучению или прохождению через газ продуктов распада *атомных ядер*, то газовый разряд называют несамостоятельным. В этом случае при устранении внешнего ионизатора ток через газ прекращается. В ионизационных камерах и газовых счетчиках быстрых заряженных частиц протекает именно этот вид газового разряда.

большую роль играет газовый разряд в магнитном поле (рис. 4).

В общем можно сказать, что газовым разрядом называют прохождение электрического тока через газы. Здесь рассказывалось о видах самостоятельного газового разряда, когда носители электрического тока рождаются под действием электрического поля. Если же ток в газе переносят носители, образовавшиеся благодаря внешнему воздействию, например электромагнитному ионизирующему излучению или прохождению через газ продуктов распада *атомных ядер*, то газовый разряд называют несамостоятельным. В этом случае при устранении внешнего ионизатора ток через газ прекращается. В ионизационных камерах и газовых счетчиках быстрых заряженных частиц протекает именно этот вид газового разряда.

дельный выпрямитель (см., например, в кн.: Борисов В. Г. Юный радиолюбитель. — М., 1974). Вольтметр V имеет предел измерения 150 В, максимальное сопротивление потенциометра $R = 47$ кОм. Когда напряжение на лампочке увеличивается, в ней сначала течет очень малый темновой ток, и сопротивление лампочки велико. При некотором напряжении $U_{зажигания}$ вспыхивает тлеющий разряд. Для лампочек типа ТН-02—2 $U_{зажигания} \simeq 80$ В. В этот момент сопротивление лампочки уменьшается, ток увеличивается, а напряжение падает: $U_{разряда} \simeq 60$ В. Перемещая дальше ручку потенциометра, вы заметите, что показания вольтметра не изменяются. При этом ток увеличивается, и разрядом охватывается все бо́льшая площадь катода.

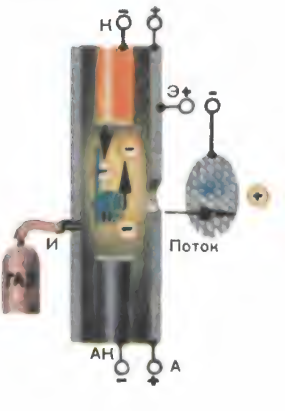
Если приложить к лампочке еще большее напряжение (чего нельзя сделать в нашей схеме), в ней вспыхивает дуговой разряд, и лампочка выходит из строя.

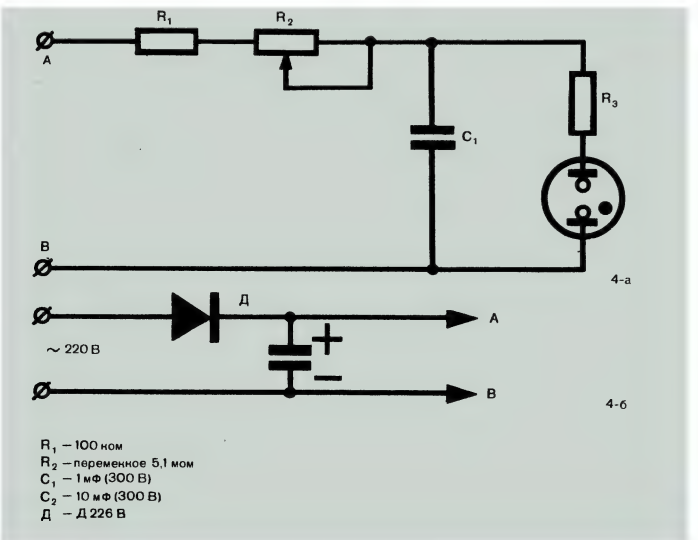
Учитывая, что напряжение, при котором в неоновой лампочке происходит вспышка разряда, выше, чем ее рабочее напряжение, можно сделать с помощью лампочки простой генератор колебаний. Его принципиальная схема приведена на рис. 4а. К точкам A и B может быть либо подключен выпрямитель, использовавшийся в предыдущем опыте, либо совсем простой, однополупериодный выпрямитель (рис. 4б). Работает генератор следующим образом.

В момент включения в цепь емкости C_1 генератор начинает заряжаться через сопротивления R_1 и R_2. Лампочка не горит (ее сопротивление можно считать бесконечно большим). Напряжение на обкладках C_1 растет со временем t по закону $U = U_0(1 - e^{-t/RC})$, где U_0 — напряжение в сети, $R = R_1 + R_2$, $C = C_1$ и e — основание натуральных логарифмов — число, равное 2,72.

Когда U станет равным $U_{зажигания}$, лампа вспыхнет, ее сопротивление резко уменьшится, и емкость начнет разряжаться.

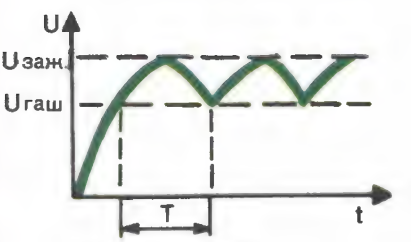
Рис. 4. Источник многозарядных ионов. *А* — анод; *К* — катод; *АК* — антикатод; *Н* — вектор напряженности магнитного поля; *Э* — вытягивающий электрод; *И* — источник газа. *К — АК* — область газового разряда. В этой области электроны превращают атомы газа в многозарядные ионы.





Процесс этот идет с гораздо большей скоростью, чем зарядка, и продолжается до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не снизится до $U_{гашения}$. Лампа затухнет, и цикл повторится снова. На экране осциллографа вы можете увидеть картину, подобно представленной на рис. 5.

Меняя величину емкости C_1 и сопротивления R_2, можно получить разную частоту вспыхивания лампы.



Период колебаний

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Электродинамика — раздел физики, изучающий взаимодействие электрических зарядов. Он включает в себя *электростатику* как некоторый частный и наиболее простой случай взаимодействия неподвижных зарядов. Взаимодействие между движущимися зарядами удается описать благодаря использованию в электродинамике понятий электрического и магнитного полей, причем часто невозможно отделить одно поле от другого, и поэтому говорят об электромагнитном поле.

Опыт показывает, что силу, действующую на движущийся заряд, можно представить как сумму двух слагаемых:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix}\text{электрическая}\\ \text{сила}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{магнитная}\\ \text{сила}\end{pmatrix}.$$

Первое слагаемое не зависит от того, движется заряд или он неподвижен, и в связи с этим электрическая сила имеет в точности такое же выражение, как и в электростатике:

$$\begin{pmatrix}\text{электрическая}\\ \text{сила}\end{pmatrix} = q\cdot\vec{E},$$

где q — величина заряда, $\vec{E}$ — напряженность электрического поля. Второе слагаемое, которое называют силой Лоренца, зависит от скорости частицы и связано с магнитным полем. Если напряженность электрического поля задается в каждой точке вектором $\vec{E}$, то величина магнитного поля характеризуется вектором $\vec{B}$, называемым вектором магнитной индукции.

Создается магнитное поле, в отличие от электрического, только движущимися зарядами. Выражение для силы Лоренца выглядит сложнее, чем для электрической силы, по абсолютной величине она равна:

$$\begin{pmatrix}\text{магнитная}\\ \text{сила}\end{pmatrix} = q|\vec{v}|\cdot|\vec{B}|\cdot\sin\alpha.$$

Сила Лоренца пропорциональна заряду частицы q, ее скорости $\vec{v}$ и зависит от направления движения заряда. Угол α — это угол между вектором скорости и вектором индукции $\vec{B}$. Направление силы Лоренца определяется следующим образом: сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору магнитной индукции, и это означает, что $\vec{B}$ указывает то выделенное направление в пространстве, вдоль которого не действуют магнитные силы; кроме того, вектор силы Лоренца перпендикулярен и вектору скорости заряда $\vec{v}$. Окончательное направление силы (например, вверх или вниз на рисунке) можно определить с помощью правила левой руки (для отрицательного заряда направление силы изменится на противоположное). Поскольку сила Лоренца перпендикулярна ско-

АНДРЕ МАРИ АМПЕР (1775 — 1836)

Французский физик и математик, один из основоположников новой области физики—*электродинамики*— Андре Мари Ампер родился в городе Лионе. Он получил разностороннее образование: изучал иностранные языки, математику, естественные науки. Ампер прочел все 20 томов знаменитой «Энциклопедии» Д. Дидро и Ж. Л. Д'Аламбера, труды Л. Эйлера, Д. Бернулли, Ж. Л. Лагранжа.

В 1801 г. Ампер возглавил кафедру физики в Центральной школе в г. Бурк-ан-Брес, а в 1805 г. получил место репетитора в Политехнической школе в Париже. В этот период вышли в свет его работы по теории вероятностей, приложению вариационного исчисления к задачам механики и математическому анализу. В 1814 г. его избирают членом Парижской академии наук, с 1824 г. он профессор Нормальной школы в Париже.

Работы Ампера в области физики сразу привлекли к себе внимание. После открытия в 1820 г. датским ученым Х. К. Эрстедом действия электрического тока на магнитную стрелку Ампер предложил «правило пловца» для определения направления отклонения магнитной стрелки током. Продолжая эти исследования, он открыл механическое взаимодействие электрических токов и установил количественные соотношения для определения силы этого взаимодействия (закон Ампера, см. *Электродинамика*).

Ампер различает два понятия — ток и напряжение, устанавливает направление тока в замкнутой цепи. (Поэтому не случайно единица силы тока носит его имя.) Он установил также, что параллельные проводники с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а в противоположном — отталкиваются.

Ампер разработал теорию магнетизма, представление о магните как о совокупности круговых электрических токов, расположенных в плоскостях, перпендикулярных к линии, соединяющей полюса магнита.

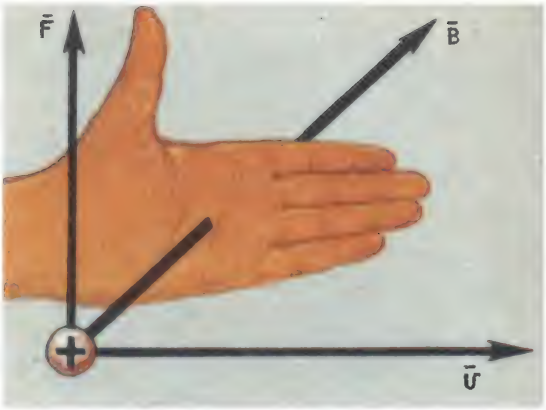
В 1826 г. вышел в свет его основной труд по электродинамике — «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

рости (и перемещению заряда), то работа этой силы всегда равна нулю. Магнитное поле не может изменить величину скорости заряженной частицы, изменяется лишь направление скорости. Так, в однородном магнитном поле ($B = const$) траектория заряженной частицы, движущейся перпендикулярно магнитному полю, представляет собой окружность.

На практике мы, как правило, имеем дело не с отдельными зарядами, а с потоками очень большого числа частиц. Поток заряженных частиц называется электрическим током, причем принято считать, что направление электрического тока совпадает с направлением движения положительных зарядов. Силой тока сквозь поверхность S называется величина, равная полному заряду, который проходит через эту поверхность за единицу времени. Например, сила тока в проводнике — это величина заряда, который проходит за 1 с через все поперечное сечение проводника.

В проводниках (например, в *металлах*) обычно содержится колоссальное количество зарядов, и поэтому эти заряды очень хорошо скомпенсированы: количества положительных и

Правило левой руки для силы Лоренца.



ЭМИЛИЙ ХРИСТИАНОВИЧ ЛЕНЦ (1804 — 1865)

Русский физик и электротехник Эмилий Христианович Ленц родился в Дерпте (ныне Тарту). Учился в Дерптском университете, но, не закончив обучения, отправился на шлюпе «Предприятие» в трехлетнее кругосветное путешествие. Богатый материал, собранный во время плавания, позволил Э. Х. Ленцу провести ряд блистательных географических исследований. По их результатам в 1828 г. Ленц избирается адъюнктом Петербургской Академии наук, а в 1834 г. — академиком и принимает активное участие в реорганизации физической лаборатории Академии наук. Здесь он начинает свои знаменитые исследования в области электричества и магнетизма.

Среди многочисленных научных работ Ленца наиболее известны две: «Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией» (1833) и «О законах выделения тепла гальваническим током» (1842). В первой из них устанавливается правило, которое определяет направление индукционных токов и носит имя ученого. По правилу Ленца, возникающий в замкнутом контуре индукционный ток направлен так, что создаваемый им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится препятствовать тому изменению потока, которое вызывает данный ток. Во второй работе описан закон, ныне известный в науке как закон Джоуля — Ленца. Этот закон теплового действия электрического тока был установлен в 1841 г. английским физиком Дж. Джоулем и независимо от него в 1842 г. Э. Х. Ленцем.

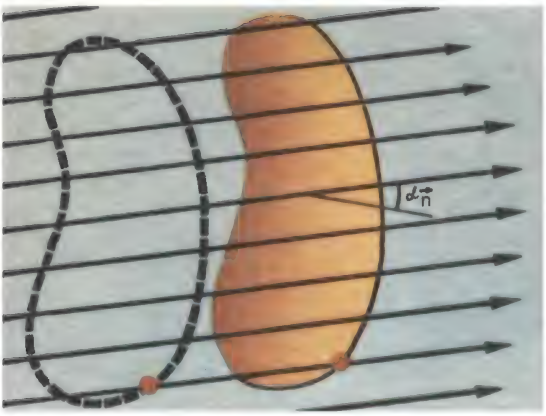
При анализе процессов, происходящих в электрическом генераторе, Ленц применил изобретенный им прибор для изучения формы кривой переменного тока. Ему принадлежат также работы по установлению зависимости сопротивления металлов от температуры, созданию баллистического метода для измерения магнитного потока (совместно с русским ученым Б. С. Якоби) и др.

Труды Ленца дают основание считать его одним из создателей учения об электричестве и теоретических основ электротехники.

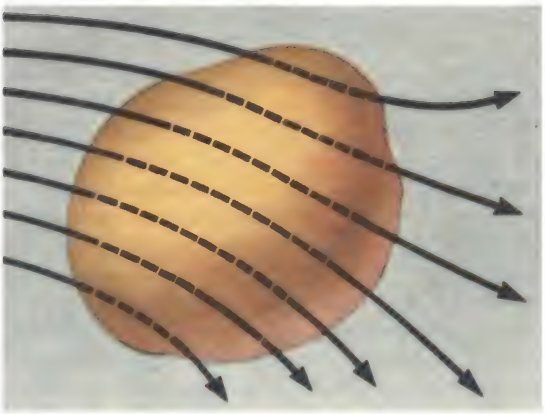
Он известен также работами по *геофизике* — исследованиями распределения температуры и солености воды в океанах и суточного хода температуры воздуха на разных широтах и т. д.

Кроме научной деятельности Э. Х. Ленц многие годы возглавлял кафедру физики и физической географии в Петербургском университете, а с 1863 г. был ректором университета. Заглядывая в будущее, он придавал большое значение преподаванию физики в средней школе. Его научный труд «Руководство к физике, составленное... для русских гимназий» (1839) издавался 11 раз.

Поток жидкости через площадку (его направление составляет угол с перпендикуляром к этой площадке).



Поток магнитного поля через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю.



отрицательных зарядов равны между собой. Следовательно, суммарная электрическая сила, действующая на проводник, равна нулю. Магнитные же силы, действующие на отдельные заряды в проводнике, не компенсируются, так как при наличии тока скорости движения положительных и отрицательных зарядов различны. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, равна:

$$F = I \cdot l \cdot |\vec{B}| \cdot \sin\alpha.$$

Здесь I — сила тока, l — длина проводника, α — угол между магнитным полем и направлением тока. Это равенство, называемое законом Ампера, исторически было получено раньше, чем сила Лоренца, однако сила Ампера — это есть не что иное, как сумма сил Лоренца, действующих на отдельные заряды в проводнике.

Таким образом, если нам известны электрическое и магнитное поля ($\vec{E}$ и $\vec{B}$), то по известным правилам можно подсчитать силы, действующие на движущийся заряд (или электрический ток), и поэтому задача расчета взаимодействия движущихся зарядов сводится к расчету электромагнитного поля. В электродинамике электромагнитное поле описывается 4 уравнениями Дж. Максвелла. Для того чтобы познакомиться с ними, необходимо определить понятия потока электрического и магнитного полей. Проще всего это сделать, используя аналогию с потоком жидкости сквозь площадку S, показанную на рисунке. Очевидно, за 1 с площадки S достигнут частицы жидкости, расположенные от нее не дальше чем на расстоянии $l = |\vec{v}|$; объем жидкости, который за это время протечет через площадку, равен:

$$G = |\vec{v}| \cdot S \cdot cos\alpha.$$

Если рассматривать не жидкость, а поток заряженных частиц (электрический ток), то поток заряда, проходящий через площадку за 1 с,— это и есть сила тока, равная:

$$I = \rho|\vec{v}| \cdot S \cdot cos\alpha,$$

где ρ — плотность заряда (в единице объема в потоке). Теперь по аналогии можно чисто формально определить поток электрического поля

$$\Phi_E = |\vec{E}| \cdot S \cdot \cos\alpha$$

и магнитного поля

$$\Phi_B = |\vec{B}| \cdot S \cdot \cos\alpha.$$

Если магнитное и электрическое поле меняется от точки к точке на площадке, то в выражениях для потоков, как и в случае с жидкостью, нужно подставить средние значения $\vec{E}$ и $\vec{B}$ на площадке.

Запишем первое уравнение Максвелла:

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0}(q_1 + q_2 + \ldots), \quad (1)$$

Φ_E — поток электрического поля через любую замкнутую поверхность; $q_1 + q_2 + \ldots$ — сумма зарядов внутри этой поверхности

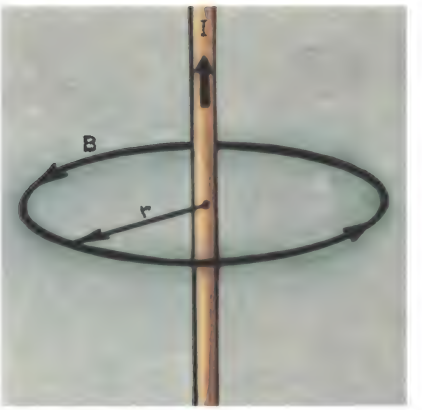
где ε_0 — константа, называемая электрической постоянной.

Как бы мы ни меняли расположение зарядов внутри выбранной нами поверхности, окружающей некоторый объем, поток электрического поля через эту поверхность остается одним и тем же. В *электростатике* это уравнение называется теоремой Гаусса, оно эквивалентно закону Кулона. Но в отличие от закона Кулона теорема Гаусса справедлива и в общем случае, когда заряды движутся.

Второе уравнение Максвелла описывает явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем. Если поток магнитного поля, проходящий сквозь площадку, ограниченную замкнутым контуром (например, гибкой проволочкой), изменяется во времени, то в этом контуре воз-

никает ЭДС индукции, равная $\varepsilon = -\Phi'_B(t)$ (здесь Φ_B — это производная по времени от магнитного потока). Выражение для потока магнитного поля включает в себя три сомножителя: $B \cdot S \cdot \cos\alpha$, и совершенно не важно, по какой причине поток через контур меняется со временем: изменяется ли магнитное поле, площадь контура или его ориентация, т. е. угол α,— в любом случае результат будет одинаковым. Не требуется, чтобы контур был проводящим; это может быть любой воображаемый контур. Другое дело, если на место этого контура поместить проводник — по проводнику под действием ЭДС потечет электрический ток. ЭДС индукции — это работа, которую совершает электрическое поле при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру, т. е. произведение средней силы, действующей на заряд вдоль контура, на длину контура l. Но сила, которая действует на единичный положительный заряд, равна касательной к контуру составляющей вектора напряженности. Если обозначить эту составляющую E_τ и заменить в законе Фарадея ε на $E_\tau \cdot l$, то получится второе уравнение Максвелла:

Магнитное поле прямого проводника с током.



$$\underset{\text{среднее значение касательной к контуру составляющей}}{E_\tau} \times \underset{\text{длина контура}}{l} = -\underset{\text{поток через площадь, ограниченную контуром}}{\Phi'_B(t)}. \quad (2)$$

В электростатике правая часть уравнения (2) обращается в нуль, а это означает, что работа

ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ (1831 — 1879)

Джеймс Клерк Максвелл родился в Эдинбурге, в семье шотландского дворянина. Он получил образование в Эдинбургском и Кембриджском университетах. В 1860 г. Максвелл стал профессором Лондонского университета, а с начала 1870-х гг. — профессором Кембриджского университета, где он основал первую в Англии специально оборудованную физическую лабораторию — Кавендишскую лабораторию. В 1860 г. он был избран членом Лондонского королевского общества (академии наук Англии).

Одну из своих ранних научных работ — исследование об овальных кривых — Максвелл написал еще в 15-летнем возрасте. Будучи студентом Эдинбургского университета, он сделал в Эдинбургском королевском обществе — академии наук Шотландии — доклад о равновесии упругих тел, доказал теорему, известную ныне в теории упругости и сопротивления материалов как теорема Максвелла.

В 1855 г. Максвелл провел ряд исследований по теории цветового зрения.

В том же году он начал исследование «О фарадеевых силовых линиях», которое продолжал, по существу, в течение всей своей жизни.

«Я старался, — писал Максвелл, — ...представить математические идеи в наглядной форме, пользуясь системами линий или поверхностей, а не употребляя только символы, которые и не особенно пригодны для изложения взглядов Фарадея, и не вполне соответствуют природе объясняемых явлений».

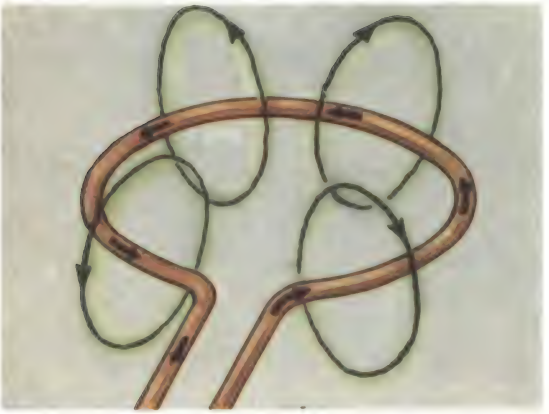
И далее: «Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии».

Таково первое в истории физики определение электромагнитного поля. Фарадей начал разработку идеи, Максвелл блестяще завершил ее, создав теорию электромагнетизма. Дальнейшее развитие этой теории привело Максвелла к выводу об электромагнитной природе света.

Максвелл выразил законы электромагнитного поля в виде системы четырех дифференциальных уравнений, которые легли в основу *электродинамики*.

Пользуясь методами математической статистики, он сформулировал в *кинетической теории газов* закон распределения молекул идеального газа по скоростям. Выполнил также ряд крупных работ по *оптике*, теории упругости, молекулярной физике.

Магнитное поле рамки с током.



электрических сил при перемещении заряда по любому замкнутому контуру тоже равна нулю. Это замечательное свойство электрического поля, которое в электростатике позволило ввести электрический потенциал, исчезает, как только появляется переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты и работа которого на замкнутом контуре уже не равна нулю. В общем случае полное электрическое поле складывается из поля, создаваемого электрическими зарядами, и вихревого электрического поля, возникающего от переменных магнитных полей. Явление электромагнитной индукции лежит в основе работы генераторов электрического тока на электростанциях, а в физических исследованиях вихревые электрические поля используются в *ускорителях заряженных частиц*.

Вторая пара уравнений Максвелла описывает магнитные поля:

$$\Phi_B = 0. \qquad (3)$$

Φ_B — поток магнитного поля через любую замкнутую поверхность

Третье уравнение Максвелла отражает тот факт, что в природе нет магнитных зарядов. Как известно из электростатики, силовые линии электрического поля начинаются на положительных и кончаются на отрицательных зарядах. Если мы проведем силовые линии магнитного поля, то они всегда будут замкнутыми либо уйдут на бесконечность. Следовательно, сколько силовых линий входит внутрь замкнутой, т. е. ограничивающей некоторый объем, поверхности, столько и выходит из нее, и поэтому полный поток магнитного поля через замкнутую поверхность всегда равен нулю.

Магнитное поле создают движущиеся заряды, т. е. электрический ток, и это явление описывается четвертым уравнением Максвелла. Запишем его сначала так, как оно выглядит в магнитостатике (раздел электродинамики, изучающий магнитное поле, создаваемое постоянными электрическими токами). Как и второе уравнение, оно записывается для произвольного замкнутого контура, только вместо касательной к контуру составляющей напряженности электрического поля в правую часть будет входить касательная составляющей вектора индукции B_τ:

$$B_\tau \times l = \mu_0 \cdot I. \qquad (4a)$$

B_τ — среднее значение касательной к контуру составляющей вектора; l — длина контура; I — электрический ток сквозь поверхность, ограниченную контуром

Здесь μ_0 — это константа, которая называется магнитной постоянной.

Прямой проводник с током создает магнитное поле, силовые линии которого представляют собой концентрические окружности с центром на оси проводника. Для того чтобы с помощью уравнения (4a) рассчитать величину магнитного поля на расстоянии r от провода, выберем контур, совпадающий с силовой линией. Тогда $B_\tau = |\vec{B}|$, $l = 2\pi r$, и из уравнения (4a) получаем: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Так же можно рассчитать и магнитное поле рамки с током (только сделать это сложнее), картина силовых линий которого изображена на рисунке. Магнитное поле тока пропорционально силе тока I в рамке, а значит, пропорциональным I будет и поток собственного магнитного поля через рамку: $\Phi_B = L \cdot I$. Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью рамки. Если ток в рамке будет изменяться со временем, то будет изменяться и поток собственного магнитного поля, а это означает, что в рамке возникнет ЭДС индукции, равная $\varepsilon = -L \cdot I'(t)$. Это явление называют самоиндукцией. Знак «—» в правой части последнего соотношения (как и в уравнении 2) отражает правило Ленца: ЭДС индукции всегда стремится препятствовать изменению магнитного потока через контур.

Уже говорилось, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле (явление электромагнитной индукции). Максвелл теоретически предсказал, что магнитное поле может создаваться не только электрическим током, но и переменным электрическим полем. Согласно Максвеллу, в правой части уравнения (4a) должно стоять дополнительное слагаемое, пропорциональное скорости изменения электрического поля, и полностью четвертое уравнение Максвелла выглядит так:

$$B_\tau \cdot l = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \Phi_E'(t). \qquad (4)$$

Здесь Φ_E — это поток электрического поля сквозь произвольный контур.

Если переменное электрическое поле порождает магнитное, а переменное магнитное поле порождает электрическое, то электромагнитное поле может существовать и в отсутствие зарядов. В *вакууме* электромагнитное поле существует в виде *электромагнитных волн*, которые распространяются со скоростью $c \simeq 3 \cdot 10^8$ м/с, т. е. со скоростью света (свет — это тоже электромагнитные волны). Электромагнитные волны обладают энергией и импульсом, и, следовательно, электромагнитное поле — это не просто формальный способ описания взаимодействия зарядов, а такая же физическая реальность, как заряды и электрические токи. Существование электрических волн, которые впервые на опыте наблюдал Г. Герц, прекрасно подтверждает теоретическое предположение Дж. Максвелла.

ЭЛЕКТРОЛИЗ

Электролиз — под таким названием объединяются физико-химические процессы, происходящие на электродах, когда через растворы или расплавы электролитов проходит *электрический ток*. Механизмы процессов, протекающих на положительном и отрицательном электродах, различны. На аноде идет реакция электрохимического окисления, поскольку там ионы, атомы или молекулы отдают *электроны*. Напротив, на катоде к различным частицам присоединяются электроны, и те реакции, которые здесь происходят, — это реакции электрохимического восстановления.

Электролиз подчиняется законам, которые были открыты английским ученым М. Фарадеем в 1833—1834 гг.

Первый закон Фарадея гласит: количество вещества M, выделяющегося на электроде, прямо пропорционально электрическому заряду q, прошедшему через электролит: $M = kq$.

Коэффициент пропорциональности k, численно равный массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единицы электрического заряда, называется электрохимическим эквивалентом вещества. При пропускании через электролит постоянного тока I в течение времени t с $q = It$ и $M = kIt$.

Согласно второму закону, электрохимические эквиваленты элементов прямо пропорциональны их химическим эквивалентам: $k = c\frac{A}{Z}$, где отношение атомного веса A

МАЙКЛ ФАРАДЕЙ (1791 — 1867)

Гениальный самоучка — так можно назвать человека, ставшего основоположником учения об электрических и магнитных полях. Майклу Фарадею не пришлось учиться сколько-нибудь систематически. Сын лондонского кузнеца, ученик переплетчика, он закончил лишь начальную школу и далее всю жизнь занимался самообразованием.

Посещая в Королевском институте публичные лекции выдающегося английского химика Г. Дэви, Фарадей принял решение посвятить себя науке. В 1813 г. Г. Дэви взял М. Фарадея по его просьбе на работу в Королевский институт, а в 1827 г. М. Фарадей стал профессором этого института. В 1824 г. он был избран членом Лондонского королевского общества.

Уже первые его работы по химии привлекли внимание европейских ученых.

Однако всемирную славу Фарадею принесли исследования в области физики, а точнее — электричества и магнетизма. В 1821 г. он построил первый в мире электродвигатель. Тогда же Фарадей записал в своем дневнике задачу, которую он перед собой поставил: «Превратить магнетизм в электричество». Решение ее заняло около 10 лет. Лишь в 1831 г. Фарадей начал публикацию «Экспериментальных исследований по электричеству».

В трех томах этого своего главного труда ученый рассказал на основании проведенных им опытов об открытии явления электромагнитной индукции, описал конструкцию униполярной динамомашины — первого генератора электрического тока. Затем Фарадей установил основные законы *электролиза*, которые стали фундаментом новой научной отрасли — электрохимии. И наконец, он пришел к открытию новой в науке идеи силовых линий, а затем и электромагнитных полей.

Впоследствии идея существования электромагнитных полей была доказана математически Дж. К. Максвеллом.

В 1845 г., исследуя магнитные свойства различных материалов, Фарадей открыл явления парамагнетизма и диамагнетизма (см. *Магнетизм*).

Ф. Энгельс оценивал Фарадея как величайшего исследователя в области электричества.

элемента к его валентности Z называется химическим эквивалентом. Количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, равна его химическому эквиваленту, называется грамм-эквивалентом. Величина $F = 1/c$ называется числом Фарадея. F равно электрическому заряду, который нужно пропустить через электролит для выделения на электроде 1 грамм-эквивалента любого вещества:

$$F = 96494 \frac{\text{к}}{\text{г-экв}} \approx 9{,}65 \cdot 10^4 \frac{\text{к}}{\text{г-экв}}.$$

Величина F равна произведению заряда электрона на число Авогадро (см. *Авогадро закон и число*).

Электролиз — физико-химический процесс, отражающий тесную связь физических и химических явлений. Он находит весьма широкое практическое применение. С его помощью получают многие химические соединения, которые иным путем приготовить не удается, чистые металлы в виде порошков и т. д. Процесс электролиза используется для коррозионной защиты различных *металлов*.

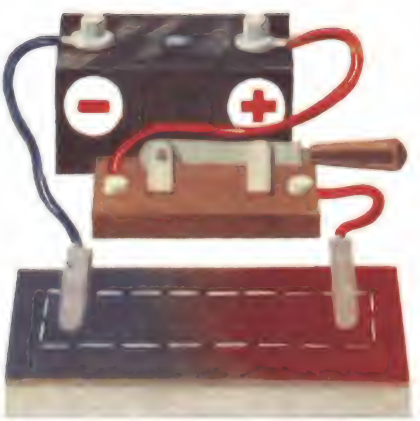
На практике электролиз проводят в специальных аппаратах — электролизерах. Их изготовляют из стали, керамических материалов, стекла, пластических масс. Электроды делают из различных металлов и сплавов. Иногда в ходе электролиза на аноде и катоде образуются такие вещества, взаимодействия которых надо избежать. С этой целью в электролизер вставляют пористую перегородку — диафрагму.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Все окружающее нас пространство пронизано электромагнитным излучением. Солнце, окружающие нас тела, антенны радиостанций и телевизионных передатчиков испускают электромагнитные волны, которые в зависимости от их частоты колебаний носят разные названия: радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, рентгеновские лучи (рис. 1). Этот неиссякаемый поток энергии порождают колебания электрических зарядов *атомов* и *молекул*. Если заряд колеблется, то он движется с ускорением, а значит, излучает электромагнитные волны. Изменяющийся поток индукции возбуждает вихревое электрическое поле, а оно, в свою очередь, возбуждает вихревое магнитное поле. Процесс захватывает одну точку пространства за другой. Распространяющееся электромагнитное поле и называют электромагнитной волной. Скорость его распространения в вакууме $c = 299\,792\,458 \pm 1{,}2$ м/с. К такому выводу приводит теория электромагнитного поля, созданная в 1860-х гг. английским ученым Дж. Максвеллом. Вскоре после Максвелла немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн. В его распоряжении были очень простые средства: источник высокого напряжения и вибраторы — пары металлических стержней, разделенные воздушным пространством. Сейчас трудно поверить, что с такой простейшей аппаратурой Герцу уда-

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

Один из способов определения того, с какой скоростью движутся ионы в растворе под действием электрического поля, состоит в следующем. Вырежьте полоску фильтровальной бумаги длиной 10 см и шириной 2 см и укрепите ее на стекле или другой изолирующей подставке. Концы полоски должны соприкасаться с проводящими контактами, а вся электрическая цепь состоять из выпрямителя или батареи с напряжением 15—20 В (можно соединить несколько батарей последовательно), ключа и полоски, соединенных последовательно (см. рис.). Теперь займемся приготовлением электролита. Лекарство пурген (фенолфталеин) надо растворить в спирте или одеколоне и добавить несколько капель к раствору поваренной соли в воде. Пропитайте бумагу раствором и замкните ключ. У катода образуется красное пятнышко, которое разрастается и начинает перемещаться к аноду. В результате электролиза у катода происходит выделение водорода и образование ионов OH^- Они вызывают окрашивание фенолфталеина и под действием электрического поля движутся к аноду. Определив скорость перемещения красного цвета, можно оценить скорость движения ионов в электролите. Она составляет несколько миллиметров в минуту.



Следует позаботиться о том, чтобы за время опыта фильтровальная бумага не высохла, и закрыть ее сверху еще одним стеклом.

Меняя напряжение на зажимах и концентрацию солевого раствора, вы можете выяснить ряд закономерностей движения ионов.

Рис. I. Шкала электромагнитных волн.

лось выполнить тонкие эксперименты, включающие и измерение скорости распространения электромагнитной волны.

Вибратор заряжали до напряжения, необходимого для пробоя воздушного промежутка. В момент пробоя в вибраторе возникали электромагнитные колебания, которые затухали по мере того, как электрическая энергия вибратора расходовалась на электромагнитное излучение и нагрев проводников. Излучение регистри-

АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ (1859 — 1906)

Ежегодно 7 мая в нашей стране празднуется День радио. Изобретателем радио стал русский ученый Александр Степанович Попов.

Родился он в заводском поселке Турьинские Рудники на Урале. С детства увлекся техникой, строил самодельные насосы, водяные мельницы, причем старался придумать что-нибудь свое, оригинальное. Например, однажды обыкновенные часы с гирей — их называли ходиками — превратил в электрический будильник. Этот электрический прибор звонил исправно, когда следовало, но иногда «выходил из повиновения»: звонок раздавался, если поблизости сверкали грозовые разряды. Объяснить это явление тогда не мог не только гимназист Саша Попов, но и ученые-физики того времени.

Дело в том, что лишь в конце 1880-х гг. немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование *электромагнитных волн* и исследовал некоторые их свойства. А предсказал возможность их возникновения в пространстве английский ученый Дж. Максвелл в своем «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873).

После окончания физико-математического факультета Петербургского университета А. С. Попов преподает физику и электротехнику в Минном офицерском классе, а затем в Техническом училище Морского ведомства в Кронштадте.

Познакомившись с работами Г. Герца по *электродинамике*, А. С. Попов стал изучать электромагнитные явления.

В начале 1895 г. он создал первый в мире радиоприемник — «прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний», пригодный для беспроводной сигнализации (радиосвязи). 7 мая (по новому стилю) 1895 г. на заседании физического отделения Русского физико-химического общества Попов сделал научный доклад о своем изобретении и продемонстрировал его. В ознаменование этого события каждый год 7 мая и отмечается День радио. В этот день ученый высказал надежду, что «прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применен при передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний».

И уже весной 1897 г. в опытах в Кронштадтской гавани ученый достиг дальности радиосвязи 600 м, а летом того же года при испытании на кораблях —5 км.

В последние годы А. С. Попов был профессором физики и директором Петербургского электротехнического института. В 1901 г. его избрали почетным членом Русского технического общества.

А. С. Попов не был кабинетным ученым, а стремился свои изобретения поставить на службу обществу. Разработав искровой радиопередатчик и приемное устройство, он сразу же начал внедрять беспроволочное телеграфирование в морском флоте. И когда в январе 1900 г. в Балтийское море унесло на льдине 27 рыбаков, к ним на помощь вышел ледокол «Ермак», получивший приказ по радио. С этой гуманной акции началось практическое использование нового средства связи.

Эти волны совсем не похожи на волны, которые мы наблюдаем на поверхности воды. Они невидимы человеческому глазу, прячутся в солнечных лучах, излучении от далеких звезд. Но человек сумел «приручить» электромагнитные волны, научился создавать их, управлять ими, заставил работать в различных приборах, устройствах, системах. Радио-

ровалось приемным вибратором с малым пробивным промежутком. У приемного и излучающего вибраторов была одна и та же собственная частота колебаний. Поэтому излучаемая электромагнитная волна возбуждала в приемном вибраторе резонансные колебания большой амплитуды, и в промежутке между его проводниками происходил пробой — появлялись небольшие искры. По этим искрам можно было судить об интенсивности электромагнитного излучения в месте установки приемного вибратора.

Герц направлял излучение на большой металлический лист. Падающая и отраженная бегущие волны $a \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ и $a \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ складывались, образуя стоячую волну $2a \cos\frac{2\pi x}{\lambda} \cdot \sin \omega t$. Передвигая приемный вибратор, Герц нашел пучности стоячей волны A и B, измерил расстояние l между ними и определил длину волны $\lambda = 2l$. По геометрическим размерам элементов вибратора можно рассчитать его емкость и индуктивность, а следовательно, и собственную частоту колебаний ν, равную частоте излучаемой волны. Это и сделал Герц, а затем определил скорость распространения электромагнитной волны $c = \nu\lambda$. Получилась величина, равная скорости света. Это доказывало электромагнитную природу света.

Русский ученый А. С. Попов применил для регистрации радиоволн когерер — стеклянную трубку с двумя электродами, между которыми помещались мелкие металлические опилки. Когерер под действием электромагнитной волны в сильной степени меняет свое электрическое сопротивление и, включенный в цепь постоянного тока, может управлять работой телеграфного аппарата. Когерер значительно чувствительнее к электромагнитному излуче-

связь, управление по радио, телевидение, радиоастрономия — везде используются электромагнитные волны.

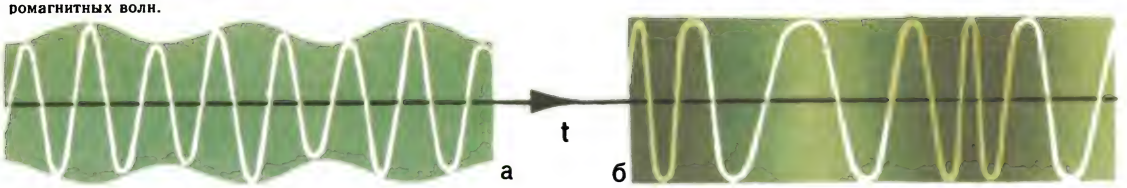
нию, чем вибратор Герца. Благодаря этому и другим усовершенствованиям А. С. Попов 7 мая 1895 г. впервые в истории осуществил радиосвязь: на расстояние 250 м были переданы слова: «Генрих Герц».

Из решений уравнений Максвелла (см. *Электродинамика*) следует, что интенсивность излучения заряда, движущегося с ускорением a, пропорциональна a^2. Как известно, ускорение колеблющегося *электрона,* как и всякой частицы, равно: $-\omega^2 \sin\omega t$. Таким образом, получается, что интенсивность излучения электронов в антенне пропорциональна ω^4. Столь сильная зависимость мощности излучения от частоты служит причиной того, что источники промышленного переменного тока практически не испускают электромагнитные волны.

Интенсивное излучение начинается при достижении частот порядка сотен тысяч герц. При этом излучение когерентного устройства, испускающего когерентные электромагнитные волны, например радиопередатчика, на больших по сравнению с его размерами и длиной излучаемой волны расстояниях может быть заменено излучением эквивалентного электрического *диполя* с переменным дипольным моментом: $\tilde{p} = \tilde{p}_0 \sin \omega t$, где $\tilde{p}_0$ — максимальное значение дипольного момента. Такой диполь называют линейным *гармоническим осциллятором.*

Волна, излучаемая гармоническим осциллятором, монохроматическая и когерентная. Ее рассматривают как плоскую монохроматическую волну, структура которой представлена

Рис. 2. Амплитудная (*а*) и частотная (*б*) модуляции электромагнитных волн.



на с. 217. У такой волны постоянная частота колебаний, векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны:

$$|\vec{E}| = E_y = A \sin(\omega t - kx); \quad |H| = H_z = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E_y.$$

В плоскости, определяемой постоянным значением $x = x_0$, концы векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ движутся по прямым линиям. Поэтому такую волну называют линейно поляризованной, а плоскость, в которой лежат вектор $\vec{E}$ и луч OX,— плоскостью поляризации. В общем случае концы векторов плоской поляризованной волны описывают эллипсоид, и такая волна называется поляризованной эллиптически.

Поляризация электромагнитной волны — очень важное ее свойство. От положения плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны, степень поглощения энергии волны кристаллами и характер рассеяния неоднородностями.

Реальные электромагнитные волны сложнее по структуре. На практике когерентной волной называют волну, у которой не меняется фаза за время наблюдения того или иного явления. Поэтому в одном эксперименте волна одного и того же источника может рассматриваться как когерентная, а в другом — как волна с меняющейся фазой. Монохроматическая когерентная волна не может нести никакой информации, кроме факта существования излучателя данной волны,— один период колебаний неотличим от другого. Запись голоса человека на волне радиопередатчика или изображения и звука на волне телевизионной станции производится путем изменения частоты, амплитуды или фазы электромагнитной волны. Такой процесс называют модуляцией (см. рис. 2). Любой вид модуляции в конечном итоге сводится к изменению частоты излучения во времени. Так, волна с амплитудной модуляцией, когда амплитуда высокочастотного излучения изменяется со сравнительно низкой частотой, может быть представлена в виде двух немодулированных волн, но с различными частотами $\omega - \Omega$ и $\omega + \Omega$:

$$a \sin \Omega t \cdot \cos \omega t = \frac{1}{2} a \sin(\omega t - \Omega t) + \frac{1}{2} a \sin(\omega t + \Omega t).$$

Электромагнитная волна переносит энергию. Объемная плотность энергии плоской поляризованной волны: $W = \varepsilon\varepsilon_0 A^2 \sin^2(\omega t - kx)$, а ее средняя величина: $\langle W \rangle = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A^2}{2}$ Дж/см^3. Энергия $E_в$, протекающая через поверхность S, перпендикулярную распространению волны, за время t, равна $E_в = \langle W \rangle vSt$. Величину $I = \langle W \rangle v$ называют интенсивностью. Электромагнитное излучение высокой частоты, рентгеновские лучи, гамма-излучение обычно рассматриваются как поток квантов-корпускул с энергией $h\nu$, где h — постоянная Планка, $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$.

Законы излучения атомов и молекул объясняет квантовая теория излучения. На ее основе построены когерентные излучатели микрорадиоволн и световых волн — *мазеры* и *лазеры*. Еще более коротковолновое излучение, чем у лазеров, возникает при торможении быстро заряженных частиц в веществе. Переход атомного ядра из одного состояния в другое и некоторые иные процессы, например аннигиляция частиц, приводят к испусканию гамма-излучения — электромагнитных волн с наиболее высокими частотами колебаний.

ЭЛЕКТРОН

Электрон — отрицательно заряженная элементарная частица, принадлежащая к классу *лептонов* (см. *Элементарные частицы*), носитель наименьшей известной сейчас массы и наименьшего электрического заряда в природе. Открыт в 1897 г. английским ученым Дж. Дж. Томсоном.

Электрон — составная часть *атома*, число электронов в нейтральном атоме равно атомному номеру, т. е. числу *протонов* в ядре.

Первые точные измерения электрического заряда электрона провел в 1909—1913 гг. американский физик Р. Милликен. Современное значение абсолютной величины элементарного заряда составляет $e = (4{,}803242 \pm \pm 0{,}000014) \cdot 10^{-10}$ единиц СГСЭ или примерно $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Считается, что этот заряд

действительно «элементарен», т. е. он не может быть разделен на части, а заряды любых объектов являются его целыми кратными. Вы, возможно, слышали о *кварках* с электрическими зарядами $e/3$ и $2e/3$, но, по-видимому, они прочно заперты внутри *адронов* и в свободном состоянии не существуют. Вместе с постоянной Планка $\hbar$ и скоростью света c элементарный заряд образует безразмерную постоянную $\alpha = e^2/\hbar c \simeq 1/137$. Постоянная тонкой структуры α — один из важнейших параметров *квантовой электродинамики,* она определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий (наиболее точное современное значение $\alpha^{-1} = 137{,}035963 \pm 0{,}000015$).

Масса электрона $m_e = (9{,}109534 \pm 0{,}000047)\cdot 10^{-28}$ г (в энергетических единицах $\simeq 0{,}5$МэВ$/c^2$). Если справедливы *законы сохранения энергии* и *электрического заряда*, то запрещены любые распады электрона, такие, как $e^- \to \nu_e + \gamma$ и т. п. Поэтому электрон стабилен; экспериментально получено, что время его жизни не менее 10^{22} лет.

В 1925 г. американские физики С. Гаудсмит и Дж. Уленбек для объяснения особенностей атомных спектров ввели внутренний момент количества движения электрона — *спин* (s). Спин электрона равен половине постоянной Планка ($\hbar = 1{,}055\cdot 10^{-34}$ Дж/с), но физики обычно говорят просто, что спин электрона равен $1/2$: $s = 1/2$. Со спином электрона связан его собственный *магнитный момент* $M = g_e s(e\hbar/2m_e c)$. Величина $e\hbar/2m_e c = 9{,}274\cdot 10^{-21}$ эрг/Гс называется магнетоном Бора $M_Б$ (это принятая в атомной и ядерной физике единица измерения магнитного момента; здесь $\hbar$ — постоянная Планка, e и m — абсолютная величина заряда и масса электрона, c — скорость света); числовой коэффициент g_e — это g-фактор электрона. Из квантовомеханического релятивистского уравнения Дирака (1928) следовало значение $g_e = 2$, т. е. магнитный момент электрона должен был равняться в точности одному магнетону Бора.

Однако в 1947 г. в опытах было обнаружено, что магнитный момент примерно на 0,1% больше магнетона Бора. Объяснение этого факта было дано с учетом *поляризации вакуума* в *квантовой электродинамике*. Весьма трудоемкие вычисления дали теоретическое значение $g_e = 2\cdot(1{,}001159652460 \pm 0{,}000000000148)$, которое можно сравнить с современными (1981) экспериментальными данными:

для электрона $g_e = 2\cdot(1{,}001159652200 \pm 0{,}000000000040)$ и позитрона $g_e = 2\cdot(1{,}001159652222 \pm 0{,}000000000050)$.

Величины вычислены и измерены с точностью до двенадцати знаков после запятой, причем точность экспериментальных работ выше точности теоретических расчетов. Это самые точные измерения в физике элементарных частиц.

Особенностями движения электронов в атомах, подчиняющегося уравнениям *квантовой механики,* определяются оптические, электрические, магнитные, химические и механические свойства веществ.

Электроны участвуют в электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях (см. *Единство сил природы*). Так, вследствие электромагнитного процесса происходит аннигиляция электрона и позитрона с образованием двух γ-квантов: $e^+ + e^- \to \gamma + \gamma$. Электроны и позитроны высоких энергий могут участвовать и в других процессах электромагнитной аннигиляции с образованием адронов: $e^+ + e^- \to$ адроны. Сейчас такие реакции усиленно изучаются на многочисленных ускорителях на встречных e^+e^--пучках (см. *Ускорители заряженных частиц*).

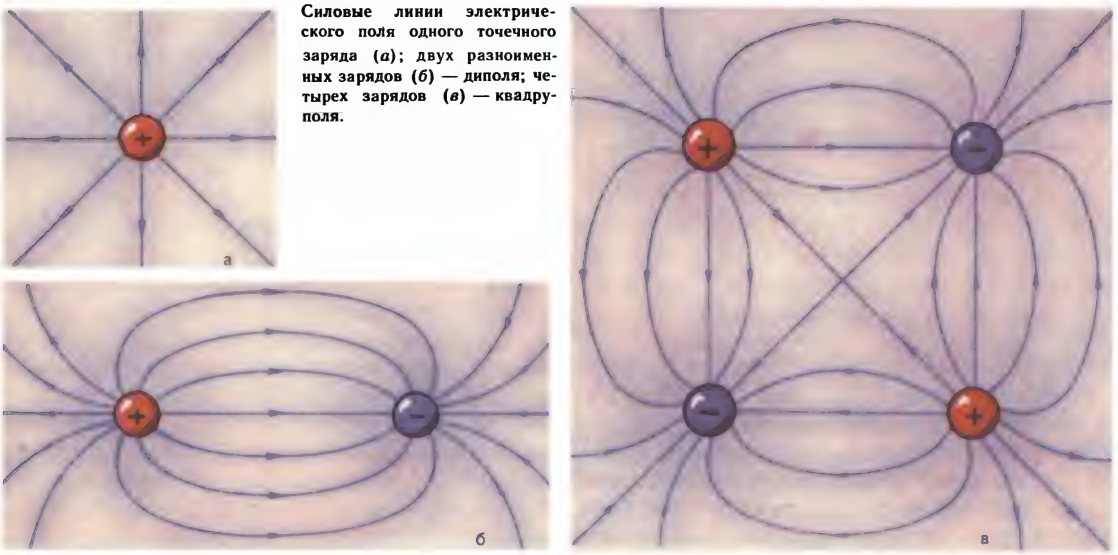
Слабые взаимодействия электронов проявляются, например, в процессах с несохранением четности (см. *Четность*) в атомных спектрах или в реакциях между электронами и нейтрино $\nu_\mu + e^- \to \nu_\mu + e^-$.

Не имеется никаких данных о внутренней структуре электрона. Современные теории исходят из представлений о лептонах как о точечных частицах. В настоящее время это проверено экспериментально до расстояний 10^{-16} см. Новые данные могут появиться лишь с повышением энергии столкновения частиц в будущих ускорителях.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электрические силы очень широко распространены в природе. Весь наш мир построен на электрическом взаимодействии зарядов: атомы существуют потому, что электроны притягиваются к заряженному ядру, все предметы которыми мы повседневно пользуемся, не распадаются на части, так как отдельные атомы «держатся» вместе за счет тех же электрических сил, и свет — это тоже электромагнитные волны.

Сейчас трудно поверить, что 250 лет назад человечество практически ничего не знало об электричестве, кроме нескольких забавных фактов, известных еще из глубокой древности: натертый шерстью янтарь или стекло притягивают легкие обрывки бумаги. Изучение электрических явлений началось в первой половине XVIII в., и к концу этого столетия об электричестве было уже известно достаточно много. Однако научное исследование электричества фактически берет начало с опытов, выполнен-



Силовые линии электрического поля одного точечного заряда (*а*); двух разноименных зарядов (*б*) — диполя; четырех зарядов (*в*) — квадруполя.

ных Ш. Кулоном, которому с помощью изобретенных им крутильных весов удалось измерить силу взаимодействия электрических зарядов и тем самым заложить основы электростатики. В настоящее время электростатика — это уже классическая область физики с хорошо разработанным математическим аппаратом, идеи которой оказали большое влияние практически на все разделы физики.

Электростатика — наука, изучающая взаимодействие неподвижных электрических зарядов,— основывается на трех экспериментальных фактах:

1. В природе существуют два сорта электрических зарядов — положительные и отрицательные заряды.

2. Между двумя точечными зарядами, т. е. зарядами, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними, действует сила, определяемая законом Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

3. Если есть несколько зарядов, то взаимодействие любых двух из них не зависит от присутствия остальных. Это так называемый принцип суперпозиции.

Все остальное в электростатике является следствием этих трех экспериментальных фактов.

На любой пробный заряд, помещенный вблизи точечного заряда, действуют электрические силы. Поэтому говорят, что вокруг электрических зарядов существует электрическое поле. Мерой электрического поля в данной точке служит его напряженность E, равная отношению силы, действующей на пробный заряд, к величине пробного заряда: $\vec{E} = \vec{F}/q$. Это отношение не зависит от нашего простейшего измерительного прибора — пробного заряда и, следовательно, характеризует поле в той точке, в которую помещен пробный заряд. Изображают электрическое поле с помощью силовых линий — линий, касательная к которым совпадает с направлением напряженности поля.

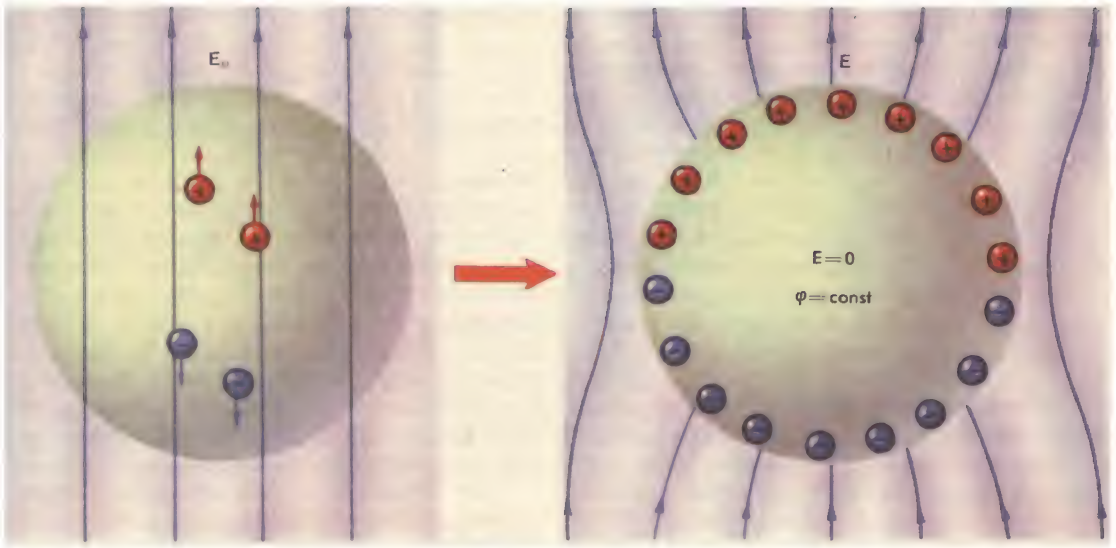
Следствие закона Кулона представляет и тот факт, что работа электрических сил при перемещении заряда не зависит от пути, по которому заряд движется из одной точки в другую, а определяется лишь положением этих точек в пространстве. Если одну из этих точек «унести» в бесконечность, то тогда каждой точке в электрическом поле можно поставить в соответствие число φ — электрический потенциал, т. е. работу, которую нужно совершить, чтобы перенести единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку. Потенциал поля одного точечного заряда q определяется формулой:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$$

Если в электрическом поле соединить все точки с одинаковым потенциалом, то мы получим поверхность равных потенциалов, или эквипотенциальную поверхность. При перемещении пробного заряда вдоль эквипотенциальной поверхности работа электрических сил равна нулю. Так может быть лишь в том случае, когда на заряд не действуют электрические силы вдоль поверхности, т. е. силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Если известно, как расположены заряды, то легко можно решить любую электростатическую задачу, поскольку задача расчета элек-

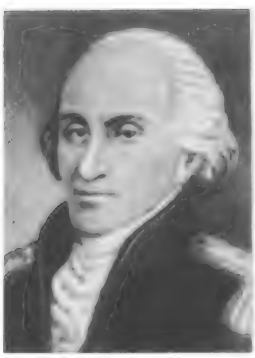
Электрическое поле внутри проводящей сферы в точности равно нулю.



трического поля в этом случае сводится к вычислению поля от каждого из зарядов (с помощью закона Кулона), а затем к сложению этих электрических полей. Однако в большинстве задач положение зарядов заранее не известно — оно само зависит от электрического поля. Так происходит, например, в том случае, когда в электрическое поле помещен п р о в о д н и к — вещество, в котором имеются свободные заряды, способные перемещаться под действием электрического поля.

В электростатике напряженность электрического поля внутри проводника всегда равна нулю: $E = 0$. Причиной тому — свободные заряды в проводнике, которые под действием внешнего электрического поля накапливаются на поверхности проводника и распределяются там таким образом, что их собственное поле полностью компенсирует внешнее электрическое поле. Естественно, что при этом все точки внутри проводника имеют одинаковый потенциал, а его поверхность представляет собой эквипотенциальную поверхность. Поверхностные заряды на проводнике искажают внешнее электрическое поле, и поэтому задача расчета внешних электрических полей в присутствии проводника становится настолько сложной, что допускает точное анали-

ШАРЛЬ ОГЮСТЕН КУЛОН (1736 — 1806)



Французский физик Шарль Кулон родился в городе Ангулеме. После окончания средней школы он поступил на военную службу. В Париже прошел инженерную подготовку и был направлен на остров Мартинику для строительства укреплений. В 1772 г. Кулон вернулся во Францию и был назначен инженером по крепостным и водным сооружениям. Одновременно со службой он проводил научные исследования. Вначале его привлекли проблемы *трения*, кручения и сопротивления материалов. Его имя стало известно в научном мире в 1777 г., когда он опубликовал ряд работ, в которых представил результаты экспериментов по измерению кручения волос, шелковых и металлических нитей. За эти работы в 1781 г. Кулона избрали членом Парижской академии наук.

Пользуясь изобретенными им крутильными весами, Кулон детально исследовал взаимодействие одноименных и разноименных точечных электрических зарядов. Эти эксперименты привели к открытию в 1785 г. основного закона *электростатики* — з а к о н а К у л о н а (см. *Электростатика*). В своих опубликованных работах 1785—1789 гг. ученый показал, что электрические заряды всегда располагаются на поверхности проводника, ввел понятия *магнитного момента* и поляризации зарядов и т. д.

Экспериментальные работы Кулона имели важное значение для создания теории электромагнитных явлений. Его именем названа единица количества электричества (К у л о н).

тическое решение лишь для проводников очень простой формы. Во всех остальных случаях для расчета полей приходится использовать быстродействующие электронные вычислительные машины.

Еще более сложные и интересные физические явления происходят с *диэлектриками* в электрическом поле. В отличие от проводников в них нет свободных зарядов, все электрические заряды в диэлектрике связанные, и поэтому под действием электрического поля заряды лишь смещаются на очень небольшие расстояния по сравнению с размерами диэлектрика — диэлектрик поляризуется. В отличие от проводников в диэлектрике поляризационные заряды могут возникать не только на поверхности, но и во всем объеме, причем собственное электрическое поле поляризационных зарядов может не совпадать по направлению с внешним полем. Исключение составляют однородные диэлектрики, граница которых совпадает с эквипотенциальными поверхностями внешнего электрического поля. Например, плоскопараллельная диэлектрическая пластина, расположенная перпендикулярно внешнему однородному полю (как в плоском конденсаторе).

В этом случае поле E внутри диэлектрика будет совпадать по направлению с внешним полем E_0, а его величина будет меньше в ε — раз: $\vec{E} = \vec{E}_0/\varepsilon$. Параметр ε называют диэлектрической проницаемостью диэлектрика.

Закон Кулона — один из фундаментальных законов физики, и в связи с этим очень важно установить степень его точности. Может быть, в закон Кулона входит не квадрат расстояния, а, например, $r^{1,9999}$ или $r^{2,0001}$? Ведь этот закон был выведен на основе эксперимента, а любые измерения, пусть даже на самых точных крутильных весах, всегда дают результат с какой-то погрешностью.

Оказывается, существует очень точный способ проверки закона Кулона, основанный на его следствии: поле внутри равномерно заряженной сферы отсутствует. Для того чтобы доказать, что электрическое поле равно нулю в любой точке внутри сферы, можно мысленно разделить всю сферу на маленькие площадки. Заряды противоположно расположенных площадок пропорциональны их площадям, а следовательно, квадратам расстояний от точки до этих площадок. И электрические поля от противоположных площадок будут компенсировать друг друга в том случае, если напряженность поля точечного заряда (площадки маленькие) будет спадать с расстоянием по закону $E \sim \frac{1}{r^2}$.

Именно такой закон спадания поля E с расстоянием дает закон Кулона.

Современные эксперименты с проводящими сферами позволяют утверждать, что показатель степени в законе Кулона равен 2 с точностью до 10^{-13}!

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Элементарными называют частицы, у которых на данный момент не обнаружено внутренней структуры. Еще в прошлом веке элементарными частицами считались *атомы*. Их внутренняя структура — *ядра* и *электроны* — была обнаружена в начале XX в. в опытах Э. Резерфорда. Размер атомов — около 10^{-8} см, ядер — в десятки тысяч раз меньше, а размер электронов совсем мал. Он меньше чем 10^{-16} см, как это следует из современных теорий и экспериментов.

Таким образом, сейчас электрон — элементарная частица. Что касается ядер, то их внутренняя структура обнаружилась вскоре после их открытия. Они состоят из нуклонов — *протонов* и *нейтронов*. Ядра довольно плотные: среднее расстояние между нуклонами всего в несколько раз больше их собственного размера. Для того чтобы выяснить, из чего состоят нуклоны, понадобилось около полувека, правда, при этом заодно появились и были разрешены и другие загадки природы.

Нуклоны состоят из трех *кварков*, которые элементарны с той же точностью, что и электрон, т. е. их радиус меньше 10^{-16} см. Радиус нуклонов — размер области, занимаемой кварками, — около 10^{-13} см. Нуклоны принадлежат к большому семейству частиц — барионов, составленных из трех различных (или одинаковых) кварков. Кварки могут по-разному связываться в тройки, и это определяет различия в свойствах бариона, например он может иметь различный *спин*.

Кроме того, кварки могут соединяться в пары — мезоны, состоящие из кварка и антикварка. Спин мезонов принимает целые значения, в то время как для барионов он принимает полуцелые значения. Вместе барионы и мезоны называются *адронами*.

В свободном виде кварки не найдены, и согласно принятым в настоящее время представлениям они могут существовать только в виде адронов. До открытия кварков некоторое время адроны считались элементарными частицами (и такое их название еще довольно часто встречается в литературе).

Первым экспериментальным указанием на составную структуру адронов были опыты по рассеянию электронов на протонах на линейном ускорителе в Станфорде (США), которые можно было объяснить, лишь предположив наличие внутри протона каких-то точечных объектов.

Вскоре стало ясно, что это — кварки, существование которых предполагалось еще ранее теоретиками.

Здесь представлена таблица современных элементарных частиц. Кроме шести видов кварков (в опытах пока проявляются только пять, но теоретики предполагают, что есть и шестой) в этой таблице приведены *лептоны* — частицы, к семье которых принадлежит и электрон. Еще в этой семье обнаружены мюон и (совсем недавно) тау-лептон (τ-лептон). У каждого из них есть свое *нейтрино*, так что лептоны естественным образом разбиваются на три пары: e, ν_e; μ, ν_μ; τ, ν_τ.

Каждая из этих пар объединяется с соответствующей парой *кварков* в четверку, которая называется поколением. Свойства частиц повторяются из поколения в поколение, как это видно из таблицы. Отличаются лишь массы: второе поколение тяжелее первого, а третье поколение тяжелее второго.

В природе встречаются в основном частицы первого поколения, а остальные создаются искусственно на *ускорителях заряженных частиц* или при взаимодействии *космических лучей* в атмосфере.

Кроме имеющих *спин* 1/2 *кварков* и *лептонов*, вместе называемых частицами вещества, в таблице приведены частицы со спином 1. Это кванты полей, создаваемых частицами вещества. Из них наиболее известная частица — *фотон*, квант электромагнитного поля.

Так называемые промежуточные бозоны W^+ и W^-, обладающие очень большими массами, были недавно обнаружены в экспериментах на встречных $\tilde{p}$ p-пучках при энергиях в несколько сотен ГэВ. Это переносчики *слабых взаимодействий* между кварками и лептонами. И наконец, глюоны — переносчики *сильных взаимодействий* между кварками. Как и сами кварки, глюоны не обнаружены в свободном виде, но проявляются на промежуточных стадиях реакций рождения и уничтожения адронов. Недавно были зарегистрированы струи адронов, порожденные глюонами. Поскольку все предсказания теории кварков и глюонов — квантовой хромодинамики — сходятся с опытом, почти нет сомнений в существовании глюонов.

Частица со спином 2 — это гравитон. Его существование вытекает из теории тяготения Эйнштейна, принципов *квантовой механики* и *теории относительности*. Обнаружить гравитон экспериментально будет чрезвычайно трудно, поскольку он очень слабо взаимодействует с веществом.

Наконец, в таблице со знаком вопроса приведены частицы со спином 0 (Н-мезоны) и 3/2 (гравитино); они не обнаружены на опыте, но их существование предполагается во многих современных теоретических моделях.

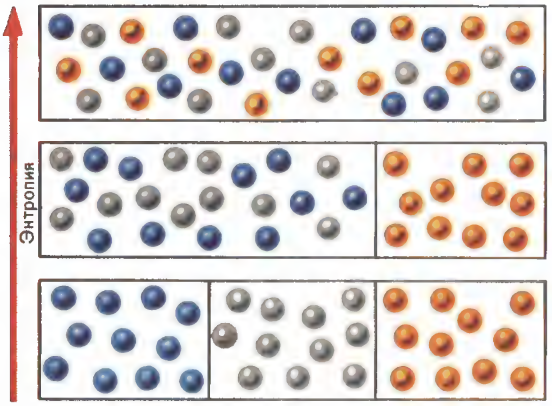
ЭНТРОПИЯ

Возможность предсказания направления процессов составляет основное содержание второго закона термодинамики. Немецкий физик Р. Клаузиус проанализировал ограничения, приводящие к односторонности процессов, и ввел функцию S, которую он назвал энтропией. В формулировке Клаузиуса (1865) второй закон термодинамики звучит так: «При самопроизвольных процессах в системах, имеющих постоянную энергию, энтропия всегда возрастает». Таким образом, система самопроизвольно переходит от условий A к усло-

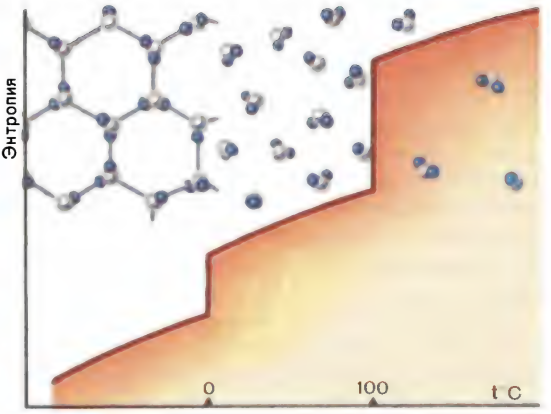
Современные элементарные частицы

Спин	0?	1/2				1				3/2?	2?
Название	Частицы Хиггса	Частицы вещества				Кванты полей					
		кварки		лептоны		фотон	векторные бозоны		глюон	гравитино	гравитон
Символ	H	u	d	ν_e	e	γ	Z	W	g		
(масса)	(?)			(0?)	(0.5)	(0)	(~95 ГэВ)	(~80 ГэВ)		(0?)	(0?)
Символ		c	s	ν_μ	μ						
(масса)				(0?)	(106)						
Символ		t	b	ν_τ	τ						
(масса)				(0?)	(1784)						
Барионный заряд	0	1/3	1/3	0	0	0	0	0	0	0	0
Электрический заряд	0, ±1	2/3	1/3	0	—1	0	0	±1	0	0	0
Цвет	—	3	3	—	—	—	—	—	8	—	—

Порядок и беспорядок в мире атомов: энтропия растет с ростом беспорядка.



Энтропия водяного пара больше энтропии воды; энтропия воды больше энтропии льда.



виям B, если $S_B > S_A$. В противном случае: $S_B < S_A$ — самопроизвольно происходит обратный процесс.

Существуют общие приемы расчета изменений энтропии при различных процессах, связанных с нагревом, охлаждением, *плавлением, испарением,* химическими реакциями и т. д. Эти приемы, рецепты расчетов составляют неотъемлемую часть *термодинамики,* и все они основаны на использовании тех или иных опытных данных. Например, чтобы рассчитать изменение энтропии при плавлении $\Delta S_{пл}$, надо теплоту плавления λ разделить на температуру плавления $T_{пл}$. Для плавления **1 моля (18 г)** льда $\lambda = 6{,}02$ кДж/моль, а $T_{пл} = 273$ К; соответственно $\Delta S_{пл} = 22$ Дж/моль·град. Энтропия воды больше энтропии льда.

Австрийский физик Л. Больцман ответил на вопрос о физическом смысле энтропии и причинах ее роста в изолированных системах (так называют системы, имеющие постоянную энергию). Согласно Больцману, энтропия — мера беспорядка в системе. Полный порядок соответствует минимуму энтропии; любой беспорядок увеличивает ее. Таким образом, физический смысл возрастания энтропии следующий: будучи предоставленным самому себе, не испытывая внешних воздействий (изолированная система), коллектив частиц стремится перейти в состояние, в котором при данных условиях возможен больший беспорядок. Максимальная энтропия соответствует полному хаосу.

Спросим себя: где больше порядка в расположении атомов — в кристаллическом *твердом теле,* где атомы занимают определенные положения (узлы) в кристаллической решетке, или в *жидкости,* где определенных, закрепленных за ним положений у атома нет? Ответ ясен: в твердом теле. Поскольку энтропия — мера беспорядка, то в жидкости она больше, чем в кристалле; как уже говорилось, энтропия воды больше энтропии льда. Сравним теперь состояние частиц в водяном паре и в воде. Положения молекул не фиксированы и там, и там. Но при комнатной температуре и атмосферном давлении 1 моль воды (18 г) занимает объем 18 см^3 (плотность воды составляет 1 г/см^3), а 1 моль водяного пара — 22,4 л, т. е. в 1000 раз больше. Где возможен больший беспорядок? Конечно, в паре. И действительно, энтропия пара больше, чем энтропия воды, причем ее изменение при испарении больше, чем при плавлении почти в 5 раз: $\Delta S_{исп} = 108$ Дж/моль·град. Критерий максимума энтропии справедлив только для изолированных тел. Иначе все тела должны были быть газами. Если тело обменивается теплом с окружающей средой, то, согласно Гиббсу, устойчивому состоянию соответствуют наименьшие значения других термодинамических функций (см. *Тепловое равновесие).* Именно поэтому ниже температуры плавления устойчиво твердое состояние, между температурами плавления и кипения — жидкое и т. д.

Больцман впервые ввел понятие термодинамической «вероятности состояния системы», или числа способов, с помощью которых можно осуществить данное состояние. Согласно Больцману, различные комбинации скоростей и координат молекул, которые могут возникать в системе в результате столкновений между молекулами, не изменяют состояния системы в механическом смысле (энергия системы остается постоянной), но в термодинамическом смысле состояние системы будет изменяться. Всякая система, состоящая из очень большого числа частиц, будет переходить от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным, осуществляющимся большим числом способов.

Связь между энтропией S и числом способов реализации данного состояния (термодинамической вероятностью) P дает известная формула Больцмана:

$$S = k \ln P + const,$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана.

Я

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В истории современной физики есть год, который называют «годом чудес». Это 1932-й год. Одним из «чудес» этого года было открытие нейтрона и создание нейтронно-протонной модели *атомного ядра*. В результате произошло выделение из *атомной физики* самостоятельного, бурно развивающегося направления — *ядерной физики*.

Ядерная физика изучает структуру и свойства *атомных ядер*. Она исследует также взаимопревращения атомных ядер, происходящие как в результате радиоактивных распадов (см. *Радиоактивность*), так и в результате различных *ядерных реакций* (см. *Деление атомных ядер, Термоядерный синтез*). К ядерной физике тесно примыкают физика *элементарных частиц*, физика и техника *ускорителей заряженных частиц, ядерная энергетика*.

Исследуя атомное ядро, ядерная физика использует различные теоретические модели, которые могут показаться противоречащими друг другу. Немецкий физик М. Борн предложил в 1936 г. гидродинамическую модель атомного ядра, согласно которой ядро уподобляется капле заряженной плотной жидкости, состоящей из интенсивно взаимодействующих между собой нуклонов (*нейтронов* и *протонов*). Как и в капле обычной жидкости, поверхность капли-ядра может колебаться, что при некоторых условиях приводит к развалу ядра, или, иными словами, к делению ядра. Американский физик М. Гепперт-Майер и одновременно немецкий физик И. Йенсен разработали в 1950 г. оболочечную модель атомного ядра, в которой нуклоны ядра движутся независимо друг от друга в некоем усредненном поле ядерных сил. Подобно *электронам* в атоме, нуклоны заполняют различные оболочки, каждая из которых характеризуется определенным значением энергии. Стремясь примирить взаимно исключающие исходные положения гидродинамической и оболочечной моделей, датские физики О. Бор и Б. Моттельсон, а также американский физик Дж. Рейнуотер разработали в начале 1950-х гг. так называемую обобщенную модель атомного ядра. Согласно этой модели, ядро состоит из сердцевины — устойчивой внутренней части (нуклоны целиком заполненных оболочек) и «внешних» нуклонов, движущихся в поле, создаваемом нуклонами сердцевины. Под влиянием внешних нуклонов сердцевина ядра может деформироваться, принимая форму вытянутого или, напротив, сплюснутого эллипсоида; может испытывать колебания.

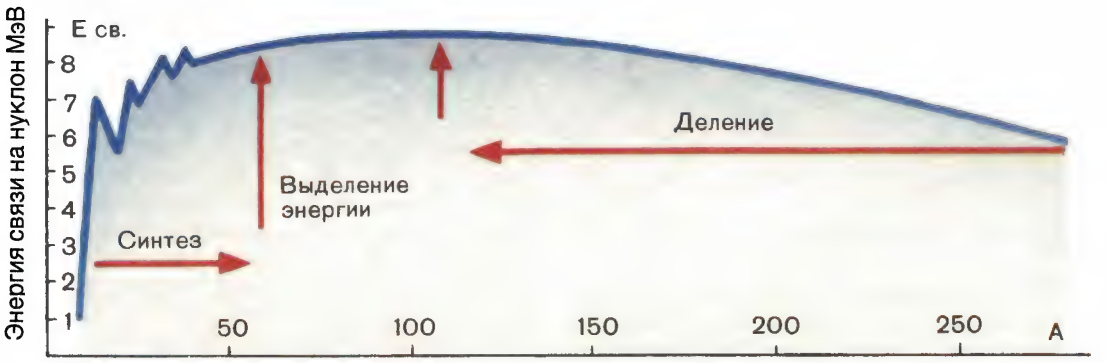
Весьма важной обширной составной частью ядерной физики является нейтронная физика. Она занимается ядерными реакциями, происходящими под действием *нейтронов*. Поскольку нейтрон электрически нейтрален, электрическое поле ядра-мишени не отталкивает его; поэтому даже медленные нейтроны могут беспрепятственно приблизиться к ядру на расстояния, при которых начинают проявляться ядерные силы. Нейтронная физика исследует также взаимодействие очень медленных нейтронов с веществом (энергия таких нейтронов порядка 0,01 эВ и меньше). Получаемые в этих исследованиях данные по рассеянию нейтронов веществом используются для выявления атомной структуры и характера движения атомов в различных кристаллах, жидкостях и отдельных молекулах.

Современная ядерная физика достаточно четко распадается на две органически взаимосвязанные «ветви» — теоретическую и экспериментальную ядерную физику. Теоретическая ядерная физика «работает» с моделями атомного ядра и ядерных реакций; она опирается на фундаментальные физические теории, созданные в процессе исследования физики микромира (см. *Квантовая механика, Сильные взаимодействия, Слабые взаимодействия, Элементарные частицы*). Экспериментальная ядерная физика использует богатейший арсенал современных исследовательских средств, включающий в себя ядерные реакторы (как источники мощных пучков нейтронов), ускорители заряженных частиц (как источники пучков ускоренных электронов, протонов, ионов, а также мезонов и гиперонов), разнообразные детекторы частиц, возникающих в ядерных реакциях (см. *Детекторы ядерных излучений*). Ядерно-физические исследования имеют огромное чисто научное значение, позволяя человеку глубже проникать в тайны строения *материи*. В то же время эти исследования необычайно важны и в практическом отношении (*ядерная энергетика*, применение в медицине и т. д.).

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

В *атомных ядрах* нуклоны (*протоны* и *нейтроны*) связаны ядерными силами, причем энергия связи $E_{св}$ различна для разных ядер. Об энергии связи можно судить по дефекту масс ядер ΔM — разнице между суммой масс нуклонов и

Энергия связи $E_{св}$ на 1 нуклон в зависимости от атомного веса (A) ядра.



массой ядра, при этом $E_{св} = \Delta Mc^2$ (c — скорость света). Измеренная таким образом зависимость $E_{св}$ (в расчете на 1 нуклон) от атомного веса ядра A достигает максимума ($E_{св} \simeq$ $\simeq$ 8 МэВ на 1 нуклон) для ядер средних масс и спадает в сторону тяжелых и легких ядер.

В ядерных реакциях деления тяжелых ядер и синтеза легких ядер, в которых продукты реакции связаны более сильно, чем исходные ядра, разница в энергиях связи переходит главным образом в кинетическую энергию ядер — продуктов и выделяется при их торможении в веществе в виде тепла.

На использовании этой энергии основана ядерная энергетика. Поскольку в ядерных реакциях выделяется энергия $\sim$ МэВ по сравнению с энергией связи атомов в молекулах $\sim$ эВ, выделяющейся в химических реакциях, теплотворная способность ядерных топлив оказывается в миллионы раз большей, чем обычных топлив.

Существуют две возможности освобождения ядерной энергии и, соответственно, два главных направления ядерной энергетики.

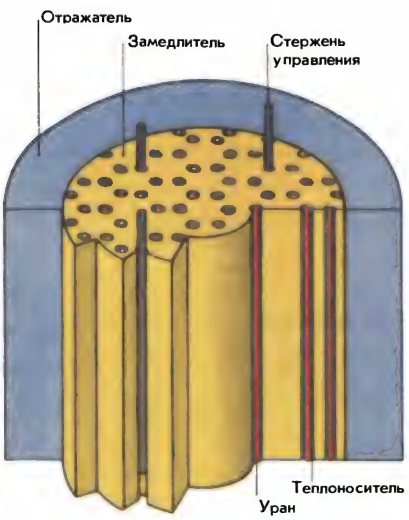
Ядерная энергетика деления основана на делении тяжелых ядер *нейтронами* с образованием двух ядер-осколков A_1 и A_2 и нескольких (ν) нейтронов. В природе есть лишь один изотоп — U^{235}, способный делиться под действием нейтронов любых энергий:

$$^{235}U + n \rightarrow A_1 + A_2 + \nu + E,$$

причем величина $E \approx 200$ МэВ, а средняя величина $\nu \approx 2{,}5$. Поскольку $\nu > 1$, возникает возможность осуществления *цепной реакции*, для чего служат ядерные реакторы деления (часто их называют атомными реакторами). Нейтроны, «рождающиеся» при делении, сталкиваясь с ядрами, могут вызвать деление, а могут поглотиться без деления или же вылететь из реактора. Лишь при некоторой концентрации делящихся ядер (критическая кон-

Ленинградская атомная электростанция им. В. И. Ленина. Один из блоков станции.

Схема активной зоны реактора.



центрация) и при некоторых размерах реактора (критический размер) в каждом следующем «поколении» цепной реакции рождается столько же нейтронов, сколько в предыдущем. В этом случае говорят о критическом реакторе, в котором осуществляется стационарная во времени цепная реакция.

В природном уране ^{235}U составляет лишь 0,7%, а 99,3% — ^{238}U, который в основном поглощает нейтроны без деления. Чтобы осуществить цепную реакцию в уране природного состава, необходимо замедлить нейтроны от энергий $E_н \approx 2$ МэВ, с которыми они рождаются при делении, до очень малых энергий $E_н \approx 1/40$ эВ, соответствующих их тепловому равновесию со средой, так как при этих энергиях резко падает вероятность поглощения нейтронов ураном-238, а вероятность поглощения их ураном-235 растет. С этой целью в реактор наряду с ураном помещают замедлитель нейтронов — вещество с малым атомным весом и слабым поглощением нейтронов (легкая или тяжелая вода, графит, бериллий). Это реактор на медленных (тепловых) нейтронах. Реактор же без замедлителя — реактор на быстрых нейтронах — может стать критическим лишь при использовании урана, обогащенного изотопом ^{235}U до концентрации около 10% и выше.

Наряду с ядерным топливом и замедлителем в состав реактора входят жидкий или газообразный теплоноситель для отвода тепла, конструкционные материалы, органы регулирования цепной реакции (например, подвижные стержни из поглощающего нейтроны материала). Обычно для уменьшения вылета нейтронов из реактора зону реакции — активную зону — окружают отражателем.

Вне собственно реактора находятся защита от его излучений, системы циркуляции теплоносителя, преобразования энергии и перегрузки топлива, входящие в состав атомной электростанции (АЭС).

ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ (1903 — 1960)

Советский ученый, академик, трижды Герой Социалистического Труда.

Родился на Урале, в городе Сим, в семье землемера. Вскоре его семья переехала в Крым, где Игорь поступил в Симферопольскую гимназию. Окончив ее с золотой медалью, он продолжил учебу на физико-математическом факультете Крымского университета, выполнив за три года четырехлетнюю учебную программу. С 1925 г. И. В. Курчатов работает в Физико-техническом институте в Ленинграде под руководством академика А. Ф. Иоффе.

Свою научную работу Курчатов начал с изучения природы *диэлектриков*. Вскоре ему удалось сделать важное открытие — обнаружить новое физическое явление, названное сегнетоэлектричеством (см. *Сегнетоэлектрики*).

Вслед за этим Курчатов одним из первых в нашей стране приступил к изучению физики *атомных ядер*. В 1934 г. он открыл явление разветвления *ядерных реакций*, вызываемых нейтронной бомбардировкой, и исследовал искусственную *радиоактивность* ряда химических элементов. В 1935 г. при облучении брома потоком *нейтронов* Курчатов и его сотрудники заметили, что возникающие при этом радиоактивные атомы брома распадаются с двумя различными скоростями. Такие атомы назвали изомерами, а открытое учеными явление — ядерной изомерией.

Наукой было установлено, что быстрые нейтроны способны разрушать ядра урана. При этом выделяется много энергии и образуются новые нейтроны, способные продолжать процесс деления ядер урана. В лаборатории И. В. Курчатова Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили, что атомные ядра урана могут делиться и без помощи нейтронов; так было установлено самопроизвольное (спонтанное) деление урана.

И. В. Курчатов был выдающимся организатором советской науки, умеющим объединять усилия больших научных коллективов для решения важнейших государственных проблем. С 1943 г. он возглавлял научные работы, связанные с использованием атомной энергии. Под его руководством был сооружен первый в СССР циклотрон (1944) и первый в Европе атомный реактор (1946), созданы атомная (1949) и термоядерная (1953) бомбы, построена первая в мире промышленная атомная электростанция (1954), начаты исследования по управляемому термоядерному синтезу.

В 1957 г. И. В. Курчатов стал лауреатом Ленинской премии. Имя Курчатова носит основанный им Институт атомной энергии и Белоярская атомная электростанция. Академия наук СССР учредила медаль имени Курчатова за выдающиеся работы в области *ядерной физики*. 104-й элемент периодической системы Менделеева назван курчатовием.

Исходя из энергии деления $E \simeq 200$ МэВ, нетрудно подсчитать, что на производство 1 Мвт·суток тепловой энергии в реакторе расходуется (делится) примерно 1 г урана по сравнению с 3 т обычного топлива (Мвт·сутки — это энергия, выделяемая источником мощностью миллион ватт за 1 сутки).

Ядерная энергетика синтеза основана на синтезе легких ядер, протекающем при высоких температурах $T \geqslant 100 \cdot 10^6$ К, когда реагирующая среда является полностью ионизированным газом — *плазмой* (см. *Термоядерный синтез*).

Изучаются различные схемы удержания горячей плазмы.

Первые опытные энергетические реакторы синтеза — термоядерные реакторы —, вероятно, будут построены к концу этого века.

Первая АЭС с реактором деления была построена и пущена в СССР, в городе Обнинске, в 1954 г. К 1984 г. мощность действующих АЭС в мире превышает 200 млн. кВт (эл) и составляет около 10% всех электрогенерирующих мощностей. В большинстве атомных электростанций используются ядерные реакторы на тепловых нейтронах с легкой водой в качестве замедлителя и теплоносителя, а также реакторы с графитовым или тяжеловодным замедлителем и охлаждением водой, углекислым газом, гелием. Ядерные реакторы используют на крупном морском транспорте (ледоколы, подводные лодки), на спутниках Земли. В современных реакторах на тепловых нейтронах сжигается (делится) ^{235}U, так что, с учетом потерь, используется только около 0,5% всего добываемого урана.

Однако запасы урана в месторождениях с высокой его концентрацией в руде (0,1% и более) невелики — 10—20 млн. т, так что по мере роста мощностей АЭС пришлось бы использовать все более бедные руды с соответствующим удорожанием ядерной энергии. Чтобы избежать этого, разрабатываются способы воспроизводства ядерного горючего путем переработки ^{238}U в искусственное ядерное горючее ^{239}Pu по реакции:

$$^{238}\mathrm{U} + n \rightarrow {}^{239}\mathrm{U} \xrightarrow{\beta} {}^{239}\mathrm{Np} \xrightarrow{\beta} {}^{239}\mathrm{Pu}.$$

Поскольку $\nu > 2$, можно, приняв меры к снижению потерь нейтронов, создать условия, при которых количество нового горючего, появившегося в результате данной реакции, станет превышать количество сгоревшего горючего.

Такое расширенное воспроизводство ядерного горючего обеспечивается в реакторах-размножителях на быстрых нейтронах. Для их охлаждения нельзя использовать воду, являющуюся хорошим замедлителем нейтронов; приходится применять с этой целью жидкий металл — натрий. Рассматривается возможность строительства быстрых реакторов с газовым или паровым охлаждением.

Первый промышленный быстрый реактор был пущен в 1972 г. в СССР, в городе Шевченко, а всего в мире работают сейчас 4 таких реактора.

Другой вид искусственного горючего можно получить в результате реакции:

$$^{232}\mathrm{Th} + n \rightarrow {}^{233}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta} {}^{233}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta} {}^{233}\mathrm{U}.$$

В настоящее время мировое производство энергии соответствует сжиганию около 10 млрд. т обычного топлива в год. В следующем веке эта величина, вероятно, возрастет в несколько раз. Ядерная энергетика способна обеспечить длительное развитие человечества без ограничений со стороны топливных ресурсов.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Существует большое количество различных типов ядерных реакций — процессов, при которых частицы (или ядра) взаимодействуют с ядрами. Первая из таких реакций наблюдалась в 1919 г. Э. Резерфордом. Это было расщепление ядра азота быстрой альфа-частицей (ядром гелия-4, см. *Альфа-распад*):

$$\underset{\text{гелий-4}}{{}^{4}_{2}\mathrm{He}} + \underset{\text{азот-14}}{{}^{14}_{7}\mathrm{N}} \rightarrow \underset{\text{кислород-17}}{{}^{17}_{8}\mathrm{O}} + \underset{\text{протон}}{{}^{1}_{1}p}.$$

Под действием бомбардирующих частиц в ядре могут происходить весьма сложные процессы, приводящие к его возбуждению, вылету одного или нескольких нуклонов (так называются *протоны* и *нейтроны* вместе), иногда к полному развалу ядра. Однако в любом случае при их протекании выполняются законы сохранения электрического заряда, полного числа нуклонов, энергии, импульса и еще целого ряда величин. Так, в приведенном выше примере сохраняются электрический заряд ($2 + 7 = 8 + 1$) и число нуклонов ($4 + 14 = 17 + 1$). Реакция идет с поглощением энергии ($Q = -1$ МэВ).

Законы сохранения позволяют сделать много важных выводов о протекании реакции. Обширный класс их связан с *нейтронами*. Эта частица — очень удобный инструмент для проникновения в глубь ядра и воздействия на него. Нейтрон не заряжен, и в отличие от заряженного протона или альфа-частицы ему не приходится преодолевать кулоновские силы отталкивания со стороны ядра. Попав в ядро, нейтрон становится участником сильного взаимодействия. При этом выделяется значительная по ядерным масштабам энергия.

Для примера рассмотрим реакцию, в которой нейтрон захватывается ядром алюминия:

$$^{1}_{0}n + {}^{27}_{13}\mathrm{Al} \rightarrow {}^{28}_{13}\mathrm{Al}.$$

Согласно теории Бора, в которой для ядра используется модель жидкой капли (см. рис.), энергия, выделившаяся при захвате, рас-

Капельная модель ядерной реакции: I — нейтрон влетает в ядро; II — ядро «разогревается»; III — энергия сосредоточивается на группе частиц; IV — вылетает α-частица, ядро «охлаждается».

пределяется между всеми частицами ядра. Капля подогревается, увеличивая свою температуру. В таком состоянии она находится довольно долго. (Правда, по ядерным масштабам «долго» означает лишь время, существенно большее $10^{-20} \div 10^{-22}$ с, т. е. времени пролета нейтрона сквозь ядро.) Пока в силу случайных обстоятельств на одной частице (или на группе частиц) снова не сосредоточится энергия, достаточная, чтобы выбросить ее за пределы ядра. Происходит частичное испарение капли, после чего она охлаждается. Испариться могут самые разные частицы. Так, в случае с $^{28}_{13}Al$ в результате испарения p получается $^{27}_{12}Mg$, при испарении α — $^{24}_{11}Na$, γ — $^{28}_{13}Al$, $2n$ — $^{26}_{13}Al$ и т. п.

Вероятность того, что реакция пойдет тем или иным путем, зависит от возбужденного состояния ядра $^{28}_{13}Al$, т. е. от энергии, привнесенной нейтроном. Чем она больше, тем разнообразнее способы распада.

Образование промежуточного ядра и его распад далеко не единственный механизм протекания ядерных реакций. Существуют прямые процессы, в которых такие ядра не образуются, реакции *термоядерного синтеза* (слияние двух легких ядер в более тяжелое), сопровождающиеся большим выделением энергии, и т. п.

Ядерные реакции широко используются для получения искусственных радиоактивных *изотопов*.

ЭНРИКО ФЕ́РМИ (1901 — 1954)

«Великий итальянский физик Энрико Ферми занимает особое место среди современных ученых: в наше время, когда узкая специализация в научных исследованиях стала типичной, трудно указать столь же универсального физика, каким был Ферми», — писал один из его учеников — советский физик Бруно Понтекорво. И это, действительно, так: трудно найти такую область физики, которой бы не занимался Ферми. И все-таки главными его работами можно, пожалуй, считать исследования, связанные с искусственной *радиоактивностью*. Созданная им в 1934 г. теория *бета-распада* и по сей день активно используется физиками для познания мира *элементарных частиц*.

Энрико Ферми родился в Риме, в семье служащего. У него рано проявились способности к точным наукам. В 1922 г. он окончил Пизанский университет, а затем продолжал свое образование в Германии и Нидерландах.

По возвращении в Италию в 1925 г. Ферми работает во Флорентийском университете, занимаясь исследованиями по квантовой физике. В 1926 г. он занял должность профессора кафедры теоретической физики Римского университета. Здесь он сделал ряд крупных теоретических и экспериментальных открытий в области *ядерной физики*. За свои работы в этой области Ферми был удостоен Нобелевской премии.

В 1938 г. Э. Ферми эмигрировал в США, где, будучи профессором Колумбийского университета, руководил исследовательскими работами в области использования ядерной энергии. Под его руководством в декабре 1942 г. в США был запущен первый в мире ядерный реактор.

В 1946 г. Ферми стал профессором Чикагского университета и занимался все последние годы жизни физикой высоких энергий.

ЯДРО АТОМНОЕ

Цепочка открытий, которые позволили заглянуть внутрь атомного ядра, сжатая до одной строки, выглядит так:

атом → электрон → атомное ядро → частицы внутри ядра.

Последние шаги были сделаны после открытия *радиоактивности*, когда физики получили прекрасный инструмент для проникновения в глубь вещества —α-частицы, или ядра гелия (см. *Альфа-распад*).

Вот эти шаги.

1911 г. Э. Резерфорд на основании опытов по рассеянию α-частиц делает заключение о существовании атомного ядра. Это открытие показало, что вещество состоит в основном из... пустоты. Вся масса атома сосредоточена в положительно заряженном ядре, размеры которого ($10^{-14} \div 10^{-15}$ м) в $10^4 \div 10^5$ раз (!) меньше, чем размеры облака легких отрицательных *электронов*.

1919 г. Эксперименты Резерфорда и его сотрудников по облучению α-частицами легких газов привели к расщеплению атомных ядер. Процесс сопровождался вылетом ядер водорода (*протонов,* как позднее назвал их Резерфорд). Тогда ученый приходит к выводу, что протоны являются структурной частью всех более тяжелых ядер.

1932 г. Английский ученый Дж. Чедвик открывает *нейтрон*, существование которого было предсказано Э. Резерфордом еще в 1921 г. Масса нейтрона оказалась очень близкой к массе протона. И в этом открытии важную роль сыграли α-частицы: нейтроны возникали при бомбардировке ими бериллиевой мишени.

После открытия нейтронов сразу и почти одновременно физики из разных стран предложили модель ядра, состоящего из протонов и нейтронов. Такая модель позволяла хорошо объяснить наблюдаемые соотношения между массами и зарядами ядер. Например, ядра гелия, состоящие их двух протонов и двух нейтронов, имеют заряд, в 2 раза превышающий заряд протона, и массу, в 4 раза бóльшую его массы. Для углерода это соотношение 6 и 12 и т. д. Нейтронно-протонная модель строения атомных ядер устранила многочисленные противоречия и трудности, имевшиеся в старой модели ядра, состоящего из протонов и электронов.

Внутри ядра протоны и нейтроны удерживаются особым видом сил — ядерными силами (см. *Сильные взаимодействия*). От более привычных нам электромагнитных сил они отличаются, во-первых, тем, что одинаково действуют на заряженный протон и не имеющий заряда нейтрон. (Когда хотят это подчеркнуть, то оба вида частиц называют нуклонами.) Во-вторых, ядерные силы проявляются только тогда, когда нуклоны находятся на малых расстояниях ($\sim 10^{-13}$м) друг от друга. На таких расстояниях величина их огромна, и они сжимают ядерное вещество до плотности в сотни миллионов тонн в 1 см^3. В природе пока известны только одни макроскопические объекты, в которых вещество сжато до ядерных плотностей, — это нейтронные звезды.

Еще одна характерная особенность ядерных сил: из-за их короткого действия нуклоны чувствуют только ближайших своих соседей. В этом смысле ядро напоминает каплю воды, в которой молекулы взаимодействуют лишь с соседними молекулами, а частицы, находящиеся на поверхности капли, стремятся втянуться внутрь, создавая *поверхностное натяжение*.

Чтобы вырвать нуклон из ядра, требуется большая энергия. Для элементов средней части периодической системы она составляет около 8 МэВ. Но ядро не просто капля, а капля заряженная. С увеличением Z — числа протонов в ядре — силы электрического отталкивания увеличиваются, а ядерные силы остаются постоянными. Поэтому ядра с очень большим Z ($Z > 100$) становятся неустойчивыми, электрические силы разрывают их. Эта нестабильность ограничивает число элементов, встречающихся в природе, а кроме того, объясняет естественную радиоактивность тяжелых ядер ($Z \geqslant 84$).

Ядра с одинаковым Z называются *изотопами,* а с одинаковым полным числом нуклонов *A* — изобарами. Сейчас для ядер приняты следующие обозначения:

$$^{A}_{Z}\text{(символ элемента)}.$$

Например, $^{4}_{2}$He, $^{3}_{2}$He — изотопы гелия (гелий-4 и гелий-3).

Стабильных изотопов известно около 350. Нестабильных, т. е. претерпевающих α- или β-распад, в природе немного. Они либо распадаются очень медленно, как, например, уран-238 (половина его атомов распадается примерно за 10^{16} лет), либо постоянно пополняются за счет действия космического излучения (углерод-14). А вот искусственных радиоактивных изотопов, получаемых на ускорителях и реакторах, известно более тысячи.

Хотя многое в теории обычных ядер еще не выяснено, исследователи думают также и о возможности существования «необычных» ядер — чисто нейтронных, сверхтяжелых, сверхплотных и т. п. Теория допускает такую возможность, но эксперименты пока не принесли положительных результатов.

ВАЖНЕЙШИЕ ОСНОВНЫЕ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

Наименование физической величины	Единицы СИ		Внесистемные единицы			
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ	Пояснение
Длина	метр	м	морская миля	м. миля	1852 м (точно)	Примерно равна 1 минуте земного меридиана
			ангстрем	А	10^{-10} м	Шведский физик Андерс Ангстрем
			сантиметр	см	10^{-2} м	
Масса	килограмм	кг	грамм	г	10^{-3} кг	
			центнер	ц	100 кг	
			тонна	т	1000 кг	
Время	секунда	с	минута	мин	60 с	
			час	ч	3600 с	
			сутки	сут	86 400 с	
Сила электрического тока	ампер	А	единица СГС		$3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ А	Французский физик Андре Мари Ампер
Температура (термодинамическая Кельвина)	кельвин	К	градус Цельсия	°С	1 К (точно) (для разности температур)	Английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин) Шведский физик и астроном Андерс Цельсий
Сила света	кандела	кд				В переводе с латинского «свеча»
Количество вещества	моль	моль				
Плоский угол	радиан	рад	градус	...°	$1{,}745329 \cdot 10^{-2}$ рад	
			минута	...′	$2{,}908882 \cdot 10^{-4}$ рад	
			секунда	...″	$4{,}848137 \cdot 10^{-6}$ рад	
Телесный угол	Стерадиан		ср			
Площадь	квадратный метр	$м^2$	гектар	га	10^4 $м^2$	
Объем	кубический метр	$м^3$	литр	л	10^{-3} $м^3$	
Скорость	метр в секунду	м/с	узел	уз.	1 узел = 1 м. миля в час = 0,514 м/с	Морской термин
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$				
Частота	герц	Гц				Немецкий физик Генрих Герц
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	грамм на кубический сантиметр	$г/см^3$	$10^3 кг/м^3$	
Сила	ньютон	Н	килограмм-сила	кгс	9,80665 Н (точно)	Английский физик Исаак Ньютон
			дина	дин	10^{-5} Н	В переводе с латинского «сила»

Давление	паскаль (ньютон на квадратный метр)	Па				Французский физик Блез Паскаль
			атмосфера (килограмм-сила на квадратный сантиметр)	кгс/см^2	98066,5 Па (точно)	Примерно равна атмосферному давлению
			миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,322 Па	
			миллиметр водного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па (точно)	
Работа, энергия	Джоуль (работа силы 1 Н на пути 1 м)	Дж				Английский ученый Джеймс Джоуль
			ватт-час	Вт·ч	3600 Дж	
			калория	кал	4,1868 Дж (точно)	
			эрг	эрг	10^{-7} Дж	
			электронвольт	эВ	$1{,}60210 \cdot 10^{-19}$ Дж	Энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов
Мощность	ватт	Вт				Английский ученый Джеймс Уатт
			лошадиная сила	л. с.	735,499 Вт	
Количество электричества; электрический заряд	кулон	Кл				Французский физик Шарль Кулон
			ампер-час	А·ч	3600 Кл	
			единица СГС		$3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ Кл	
Электрическое напряжение; разность потенциалов	вольт	В				Итальянский физик Алессандро Вольта
			единица СГС		299,7925 В	
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м				
			единица СГС		$2{,}997925 \cdot 10^4$ В/м	
Электрическая емкость	фарада	Ф				Английский ученый Майкл Фарадей
			единица СГС		$1{,}11265 \cdot 10^{-12}$ Ф	
Электрическое сопротивление	Ом	Ом				Немецкий физик Георг Ом
			единица СГС		$0{,}898755 \cdot 10^{12}$ Ом	
Магнитный поток	вебер	Вб				Немецкий физик Вильгельм Вебер
			единица СГС		10^{-8} Вб	
Магнитная индукция	тесла	Тл				Югославский изобретатель Никола Тесла
			гаусс	Гс	10^{-4} Тл	Немецкий математик Карл Гаусс
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м				
			эрстед	Э	79,5775 А/м	Датский физик Ханс Эрстед
Индуктивность	генри	Г				Американский физик Джозеф Генри
Световой поток	люмен	лм				В переводе с латинского «свет»
Освещенность	люкс	лк				В переводе с латинского «свет»
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м^2				

Спасский Б. И. Физика в ее развитии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1979, — 208 с., ил.

Тригг Дж. Физика XX века: Ключевые эксперименты / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.— 376 с., ил.

Мигдал А. Б. Как рождаются физические теории. — М.: Педагогика, 1984. — 128 с., ил. — (Б-чка Дет. энциклопедии «Ученые — школьнику»).

Захаров С. Д., Тугов И. И., Явелов Б. Е. Физика наших дней. — М.: Знание, 1977. — 157 с. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Удивительный мир физики. — М.: Знание, 1980.— 47 с., ил. — (Нар. ун-т. Фак. «Наука в твоей профессии»).

Карасев В. П. Симметрия в физике. — М.: Знание, 1978. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Тарасов Л. В. Этот удивительно симметричный мир: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1982. — 176 с., ил.

Дерябин В. М. Законы сохранения в физике: Кн. для внеклас. чтения, 8—10 кл. — М.: Просвещение, 1982. — 128 с., ил. — (Мир знаний).

Алексеева М. Н. Физика — юным. Теплота. Электричество. Кн. для внеклас. чтения, 7 кл. — М.: Просвещение, 1980. — 160 с., ил.

Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1983. — 928 с., ил.

Китайгородский А. И. Физика для всех: В 4-х кн. — М.: Наука.

Кн. 1. Физические тела / *Китайгородский А. И., Ландау Л. Д.* 1978. 206 с., ил.

Кн. 2. Молекулы / *Китайгородский А. И., Ландау Л. Д.* 1978. 207 с., ил.

Кн. 3. Электроны. 2-е изд., перераб. 1982. 205 с., ил.

Кн. 4. Фотоны ядра. 2-е изд., перераб. 1982. 207 с., ил.

Школьникам о современной физике. — М.: Просвещение, 1974—1978.

Классическая физика. Ядерная физика. М., 1974. 158 с., ил.

Физика твердого тела. М., 1975. 157 с., ил.

Физика сложных систем. М., 1978. 192 с., ил.

Школьникам о современной физике: Электромагнетизм. Твердое тело. Сб. статей / Сост. *В. Н. Руденко.* — М.: Просвещение, 1982. — 144 с., ил.

Слободецкий И. Ш., Орлов В. А. Всесоюзные олимпиады по физике: Пособие для учащихся 8—10 кл. — М.: Просвещение, 1982. — 256 с., ил.

Физико-математические олимпиады / А. П. Савин, Б. М. Брук, М. Б. Волошин и др. — М.: Знание, 1977. — 160 с., ил. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Колмогоров А. Н., Вавилов В. В., Тропин И. Т. Физико-математическая школа при МГУ. — М.: Знание, 1981. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Радунская И. Кванты и музы. — М.: Сов. Россия, 1980. — 399 с.

О физике и творчестве

АКУСТИКА

Рыдник В. И. О современной акустике: Кн. для внеклас. чтения. VIII — X кл. — М.: Просвещение, 1979. — 80 с., ил. — (Мир знаний).

Расторгуев Б. П. Окно в мир звука. — М.: Знание, 1978. — 144 с., ил. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Клюкин И. И. Удивительный мир звука. — Л.: Судостроение, 1978. — 166 с., ил.

Малахова И. Н. Первые шаги в мире звуков. — М.: Знание, 1977. — 94 с. — (Нар. ун-т. Пед. фак.).

Ганзбург М. В мире застывших звуков. — М.: Дет. лит. 1977.— 208 с.

О радиотехнике

Хорбенко И. Г. Звук, ультразвук, инфразвук. — М.: Знание, 1978. — 159 с. — (Наука и прогресс).

Хорбенко И. Г. За пределами слышимого. — М.: Машиностроение, 1981. — 168 с., ил.

Морозов В. Занимательная биоакустика: Рассказы о языке эмоций в мире животных и человека. — М.: Знание, 1983. — 184 с., ил.

Лившиц М. С. Радиолокация и эхолокация. — М.: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

АСТРОФИЗИКА

Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике: Какие проблемы представляются сейчас особенно важными и интересными? — 3-е изд., перераб. — М.: Наука, 1980. — 156 с.

Левитан Е. П. Астрофизика — школьникам: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1977. — 112 с., ил.

Физика космоса. — М.: Сов. энциклопедия, 1976. — 655 с., ил. — (Маленькая энциклопедия).

Чаругин В. М. Космология: Теория и наблюдение. — М.: Знание, 1979. — 59 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Левитт И. За пределами известного мира: От белых карликов до квазаров / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 176 с., ил.

Зигель Ф. Ю. Вещество Вселенной. — М.: Химия, 1982. — 173 с., ил.

Кузнецова Л. Вестники Вселенной. — М.: Знание, 1980. — 160 с.

АТОМ И ЯДРО

Черногорова В. А. Беседы об атомном ядре. — М.: Мол. гвардия, 1976. — 207 с., ил. — (Эврика).

Гарднер Д. Атомы сегодня и завтра. — М.: Знание, 1979. — 141 с.

Бронштейн М. П. Атомы и электроны. — М.: Наука, 1980. — 151 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Власов П. В. Беседы о рентгеновских лучах. — 2-е изд. — М.: Мол. гвардия, 1979. — 222 с., ил. — (Эврика).

Шалинец А. Б., Фадеев Г. Н. Радиоактивные элементы. — М.: Просвещение, 1981. — 144 с. — (Мир знаний).

Казаков Б. И. Превращение элементов. — М.: Знание. 1977. — 192 с., ил. — (Жизнь замечат. идей).

Флеров Г. Н., Ильинов А. С. На пути к сверхэлементам. — 2-е изд. — М.: Педагогика, 1982. — 112 с., ил. — (Б-чка Дет. энциклопедии «Ученые — школьнику»).

Боруля В. Ядерный штурм: Худож.-докум. повесть. — М.: Моск. рабочий, 1980. — 192 с.

Содди Ф. История атомной энергии / Пер. с англ.— М.: Атомиздат, 1979. — 287 с., ил.

Сивинцев Ю. В. И. В. Курчатов и ядерная энергетика. — М.: Атомиздат, 1980. — 81 с., ил.

Китайгородский А. И. Молекулярные силы. — М.: Знание, 1978. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Григорьев В. И., Мякишев Г. Я. Силы в природе. — 5-е изд., перераб. — М.: Наука, 1977.

Компанеец А. С. Что такое квантовая механика? — М.: Наука, 1977. — 215 с., ил.

Каройхази Ф. Истинное волшебство: Пер. с венг. — М.: Атомиздат, 1980. — 160 с., ил.

О квантовой механике

Данин Д. С. Вероятностный мир. — М.: Знание, 1981. — 208 с., ил. — (Жизнь замечат. идей).

Сворень Р. А. В просторы космоса, в глубины атома: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1981. — 143 с., ил.

Пономарев Л. И. По ту сторону кванта. — М.: Мол. гвардия, 1971. — 304 с., ил. — (Эврика).

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Кадомцев Б. Б., Рыдник В. И. Волны вокруг нас. — М.: Знание, 1981. — 151 с., ил.

Хазен А. М. Поле, волны, частицы и их модели: Кн. для внеклас. чтения. VIII—X кл. — М.: Просвещение, 1979. — 113 с., ил. — (Мир знаний).

Смирнов Г. В. Рожденные вихрем. — М.: Знание, 1983. — 191 с., ил. — (Жизнь замечат. идей).

Гегудин Я. Е. Капля. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1977. — 176 с., ил. — (Науч.-попул. сер.).

МЕХАНИКА

Лишевский В. П. Популярная механика. — М.: Наука, 1979. — 103 с., ил. — (Науч.-попул. сер.).

Зубов В. Г. Механика. — М.: Наука, 1978. — 351 с., ил. — (Начала физики).

Боголюбов А. Н. Механика в истории человечества. — М.: Наука, 1978. — 151 с., ил. — (Сер. «История науки и техники»).

Седов Е. А. Одна формула и весь мир: Кн. об энтропии. — М.: Знание, 1982. — 175 с., ил. — (Наука и прогресс).

Зацаринный В. П., Акопов А. И. Атланты держат небо. — М.: Знание, 1979. — 176 с., ил.

О теории прочности

Седов Л. И. Очерки, связанные с основами механики и физики. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

ОПТИКА

Мороз О. П. Свет озарений. — М.: Знание, 1980. — 208 с., ил. — (Жизнь замечат. идей).

О природе света

Кузнецов В. И. Свет. — М.: Педагогика, 1977. — 198 с., ил. — (Б-чка Дет. энциклопедии «Ученые — школьнику»).

Вавилов С. И. Глаз и солнце: О свете, Солнце и зрении. — 10-е изд. — М.: Наука, 1981. — 126 с., ил. — (Наука. Мировоззрение. Жизнь).

Левин В. М., Маев Р. Г., Проклов В. В. Свет и звук: взаимодействие в среде. — М.: Знание, 1981. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Тарасов Л. В., Тарасова А. Н. Беседы о преломлении света. — М.: Наука, 1982. — 175 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Колтун М. М. Черное и белое: (Для среднего и старшего возраста). — М.: Дет. лит., 1978. — 206 с., ил. — (Науч.-худож. лит.).

Погребысская Е. И. Оптика Ньютона. — М.: Наука, 1981. — 135 с., ил. — (Сер. «История науки и техники»).

Мальцев В. М., Селезнев В. А., Андреев В. А. Оптическое излучение. — М.: Знание, 1979. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Леонов Е. И. Интегральная оптика. — М.: Знание, 1980. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Костюрин А. А., Кринчук Г. С. Магнитооптика. — М.: Знание, 1980. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Елинсон М. И. Оптоэлектроника: (Попытка объективной оценки перспектив). — М.: Знание, 1977.— 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Бушуев В. А., Кузьмин Р. Н. Нелинейная рентгеновская оптика. — М.: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Гуревич Ю. Я. Внешний фотоэффект. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Филонович С. Р. Лучи, волны, кванты. — М.: Наука, 1978. — 208 с., ил. — (Сер. «История науки и техники»).

Тимофеев Ю. П., Фок М. В., Фридман С. А. Видим в невидимом свете. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Бахрах Л. Д., Гаврилов Г. А. Голография. — М.: Знание, 1979. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Тарасов Л. В. Оптика, рожденная лазером: Кн. для внеклас. чтения. VIII—X кл. — М.: Просвещение, 1977. — 143 с., ил. — (Мир знаний).

Уиньон М. Знакомство с голографией: Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 191 с., ил. — (В мире науки и техники).

Фролов В. С. Волшебное зеркало: Соврем. методы и средства голографии. — М.: Знание, 1979. — 144 с., ил. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Пирожников Л. Б. Что такое голография? — М.: Моск. рабочий, 1976. — 144 с., ил.

ПЛАЗМА

Милантьев В. П., Темко С. В. Физика плазмы: Кн. для внеклас. чтения. VIII—X кл. — 2-е изд., доп. — М.: Просвещение, 1983. — 159 с., ил. — (Мир знаний).

Кадомцев Б. Б., Смагин Б. И. Воплощение мечты. — М.: Сов. Россия, 1981. — 70 с.

О физике высокотемпературной плазмы

Арцимович Л. А. Что каждый физик должен знать о плазме. — 2-е изд. — М.: Атомиздат, 1977. — 112 с., ил.

Сыноров В. Ф., Суровцев И. С. Плазма — новый инструмент технологии: Плаз-струйная технология в производстве компонентов радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Каганов М. И., Френкель В. Я. Вехи истории физики твердого тела. — М.: Знание, 1981. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Поляков А. М. Разгаданный полупроводник: Кн. для внеклас. чтения. VIII—X кл. — М.: Просвещение, 1981. — 160 с., ил. — (Мир знаний).

Чернов А. А. Физика кристаллизации. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Шаскольская М. П. Кристаллы. — Перераб. изд. — М.: Наука, 1978. — 208 с., ил.

Пикин С. А., Блинов Л. М. Жидкие кристаллы. — М.: Наука, 1982. — 207 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Сонин А. С. Кентавры природы. — М.: Атомиздат, 1980. — 192 с., ил.

О жидких кристаллах

Васин М. Д., Чистяков И. Г. Жидкая радуга. — М.: Моск. рабочий, 1977. — 127 с., ил.

О жидких кристаллах

Работнов Н. С. Ларчик можно не открывать: Квантовый туннельный эффект. Полвека загадок и открытий. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 168 с., ил.

Верещагин И. К. Электролюминесценция твердых тел. — М.: Знание, 1981. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Далидчик Ф. И. Спектроскопия поверхности. — М.: Знание, 1982. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Асламазов Л. Г., Губанков В. Н. Слабая сверхпроводимость. — М.: Знание, 1982. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Каганов М. И., Нацик В. Д. Электроны, дислокации, звук. — М.: Знание, 1977. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Гарднер М. Теория относительности для миллионов / Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Атомиздат, 1979.— 159 с., ил.

Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности. — 3-е изд., доп. — М.: Сов. Россия, 1975. — 112 с., ил.

Подольный Р. Г. Чем мир держится? — М.: Знание, 1978. — 192 с., ил. — (Жизнь замечат. идей).

Теория тяготения

Кауфман У. Космические рубежи теории относительности. — М.: Мир, 1981.

Горелик Г. Е. Почему пространство трехмерно? — М.: Наука, 1982. — 167 с., ил. — (История науки и техники).

ТЕРМОДИНАМИКА

Свитков Л. П. Термодинамика и молекулярная физика: Факульт. курс. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1978. — 144 с., ил. — (Пособие для учащихся).

Смородинский Я. А. Температура. — М.: Наука, 1981. — 159 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Смородинский Я. А. Температура. — М.: Знание, 1977. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Смирнов Г. В. Под знаком необратимости: (Очерки о теплоте). — М.: Знание, 1977. — 144 с., ил.

Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля. — М.: Наука, 1983. — 175 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Этот электрический мир... / Сост. *Ю. Филатов.* — М.: Знание, 1979. — 47 с., ил. — («Наука в твоей профессии»).

Конрад В. Электротехника кратко и наглядно: Пер. с нем. — Л.: Энергия, 1980. — 207 с., ил.

Манойлов В. Е. Электричество и человек. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 152 с., ил.

Любимов К. В., Новиков С. М. Знакомимся с электрическими цепями: Пособие для любознательных юных физиков. — 2-е изд. — М.: Наука, 1981 — 110 с., ил. — (Б-чка физ.-мат. школы).

Меркулов А. П. Магнитные поля-труженики. — М.: Машиностроение, 1978. — 184 с., ил.

Костюрин А. А., Кринчик Г. С. Магнитооптика. — М.: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Карцев В. П. Магнит за три тысячелетия. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1978. — 159 с., ил.

Каганов М. И., Цукерник В. М. Природа магнетизма. — М.: Наука, 1982. — 192 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Бирзвалк Ю. А. Магнитная гидродинамика. — М.: Знание, 1979. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны. — М.: Наука, 1979. — 192 с.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Батыгин В. В. Законы микромира: Кн. для внеклас. чтения. VIII—X кл. — М.: Просвещение, 1981. — 127 с., ил. — (Мир знаний).

Черногорова В. А. Загадки микромира. — 2-е изд. — М.: Мол. гвардия, 1978. — 222 с., ил. — (Эврика).

Потупа А. С. Бег за бесконечностью. — М.: Мол. гвардия, 1977. — 223 с., ил. — (Эврика).

Развитие физики элементарных частиц

Фейнберг Дж. Из чего сделан мир? Атомы, лептоны, кварки и другие загадочные частицы / Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. — 339 с., ил. — (В мире науки и техники).

Томилин А. Н. В поисках первоначал: Науч.-худож. кн. — Л.: Дет. лит., 1978. — 254 с., ил.

История физики элементарных частиц

Этот таинственный микромир / Сост. *Т. Булатова.* — М.: Знание, 1980. — 47 с., ил. — («Наука в твоей профессии»).

Шелест В. П. Осколки. — М.: Энергоиздат, 1981. — 152 с.

Научно-популярные очерки о проблемах теоретической физики

Шелест В. П. Новый круг: Структура элементарных частиц. — М.: Атомиздат, 1978. — 144 с., ил.

Мякишев Г. Я. Элементарные частицы. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука, 1979. — 172 с., ил.

Боровой А. А. Как регистрируют частицы: По следам нейтрино. — М.: Наука, 1981. — 175 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Комар А. А. Кварки — новые субъединицы материи. — М.: Знание, 1982. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Дубовой Э. И. Таинственный мир элементарных частиц. — М.: Атомиздат, 1979. — 143 с., ил.

Гольдин Л. Л., Николаев В. И. Об ускорителях. — М.: Знание, 1982. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Физики о физике: (Элементарные частицы). Сборник. М.: Знание, 1977. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Сапожников М. Антимир — реальность? — М.: Знание, 1983. — 176 с.

Подольный Р. Г. Нечто по имени Ничто. — М.: Знание, 1983. — 192 с. — (Жизнь замечат. идей).

О вакууме

Григорьев В. И. Квантовая теория поля. — М.: Знание, 1977. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Копылов Г. И. Всего лишь кинематика. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука, 1981. — 176 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Физика микромира: Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия, 1980. — 527 с., ил.

ФИЗИКА И ДРУГИЕ НАУКИ

Волькенштейн М. В. Физика и биология. — М.: Наука, 1980. — 152 с.

Физики изучают жизнь / Ред. *Л. Н. Жукова.* — М.: Знание, 1983. — 47 с., ил. — («Твоя профессия»).

О биофизике

Иваницкий Г. Р. Борьба идей в биофизике. — М.: Знание, 1982. — 64 с.

Воловик Г. Е., Минеев В. П. Физика и топология. — М.: Знание, 1980. — 63 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Арсеньев А. А., Самарский А. А. Что такое математическая физика. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Манин Ю. И. Математика и физика. — М.: Знание, 1979. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

ДОСТИЖЕНИЯ ФИЗИКИ — НАРОДНОМУ ХОЗЯЙСТВУ

Гнедина Т. Е. Физика и современное производство: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1982. — 143 с., ил.

Васильев А. М., Глазунов А. Т., Фабрикант В. А. Физика и техника: Достижения физики — народному хозяйству. — М.: Знание, 1977. — 119 с., ил. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Башкиров Ю. А., Горелик В. С., Захаров С. Д. Физика — народному хозяйству. — М.: Знание, 1976. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Физика и научно-технический прогресс: Сб. — М.: Знание, 1977. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Петросьянц А. М. Атомная наука и техника — народному хозяйству. — М.: Энергоиздат, 1981. — 157 с., ил.

Сивинцев Ю. В. Ядерная энергетика: (Вчера, сегодня, завтра). — М.: Знание, 1980. — 48 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Проценко А. Н. Энергия будущего. — М.: Мол. гвардия, 1980. — 222 с., ил. — (Эврика).

Журбин Е. А. Мирные профессии нейтронов. — М.: Знание, 1980. — 96 с., ил. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Лазеры в строительстве. — М.: Знание, 1981. — 48 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Авсиевич Е. А. Лазеры в промышленной технологии. — М.: Знание, 1978. — 62 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Татарников В. Т. Лазер-труженик. — М.: Знание, 1976. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Каушанский Д. А. Атом и сельское хозяйство. — М.: Колос, 1981. — 159 с., ил. — (Науч.-попул. лит.).

Маслов А. Б. В поле — мирный атом. — М.: Сов. Россия, 1982. — 77 с., ил. — (Продовольственная программа в действии).

Ярмоненко С. П. Управляемые кванты: (Радиобиология — людям). Вып. 3. — М.: Знание, 1983. — 112 с. — (Нар. ун-т. Естественнонауч. фак.).

Иванов А. Г. Физика в разведке земных недр. — М.: Недра, 1971. — 200 с., ил.

Темко С. В., Соловьев Г. А., Милантьев В. П. Физика раскрывает тайны Земли: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1976. — 127 с., ил. — (Мир знаний).

Алексеев В. В. Физика и экология. — М.: Знание, 1978. — 47 с., ил. — (Общество «Знание» РСФСР. В помощь лектору).

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Перельман Я. И. Занимательная физика: В 2-х кн. / Под ред. *А. В. Митрофанова.* — 21-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1982.

Кн. 1. 1982. 224 с., ил.

Кн. 2. 1982. 272 с., ил.

Ланге В. Н. Физические парадоксы и софизмы. — 3-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1978. — 176 с., ил. — (Пособие для учащихся).

Безчастная Н. С. Физика в рисунках: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1981. — 79 с., ил.

Опыты в домашней лаборатории / Отв. ред. и авт. предисловия И. К. Кикоин. — М.: Наука, 1980. — 143 с., ил. — (Б-чка «Квант»).

Ланге В. Н. Экспериментальные физические задачи на смекалку. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Наука, 1979. — 126 с., ил. — (Б-чка физ.-мат. школы).

Маковецкий П. В. Смотри в корень!: Сб. любопытных задач и вопросов. — 4-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1979. — 382 с., ил.

Низамов И. М. Задачи по физике с техническим содержанием: Пособие для учащихся. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1980. — 96 с., ил.

Уокер Дж. Физический фейерверк: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 288 с., ил.

Чирков Ю. Занимательно об энергетике. — М.: Мол. гвардия, 1981. — 206 с. — (Эврика).

Сикорук Л. Х. Физика для малышей. — 2-е изд. — М.: Педагогика, 1983. — 167 с., ил. — (Библ. сер.).

ВЫДАЮЩИЕСЯ УЧЕНЫЕ

Иоффе А. Ф. О физике и физиках. — Л.: Наука, 1977. — 259 с.

Равич Н. Повесть о великом поморе. — М.: Дет. лит., 1976. — 174 с., ил.

О Ломоносове

Макареня А. А., Рысев Ю. В. Д. И. Менделеев: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1977. — 136 с., ил. — (Люди науки).

Смирнов Г. В. Менделеев. — М.: Мол. гвардия, 1974. — 334 с., ил. — (Жизнь замечат. людей).

Сердюков А. Р. Петр Николаевич Лебедев: 1866—1912. — М.: Наука, 1978. — 327 с., ил. — (Науч.-биогр сер.).

Гёрнек Ф. Пионеры атомного века: Великие исследователи от Максвелла до Гейзенберга: Пер. с нем. — М.: Прогресс, 1974. — 371 с., ил.

Кюри М. Пьер Кюри. — *Жолио-Кюри И., Жолио-Кюри Ф.* О Марии и Пьере Кюри: Пер. с фр. — М.: Наука, 1968. — 176 с., ил.

Кюри Е. Мария Кюри: Пер. с фр. — 4-е изд. — М.: Атомиздат, 1979. — 319 с., ил.

Кедров Ф. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри: Взгляды, идеи, эксперименты: от прошлого к будущему. — М.: Атомиздат, 1973. — 192 с., ил.

Кляус Е. М., Франкфурт У. И. Макс Планк: 1858—1947. — М.: Наука, 1980. — 391 с., ил. — (Науч.-биогр. сер.).

Кедров Ф. Эрнест Резерфорд: (Рождение ядерной физики). — М.: Знание, 1980. — 128 с., ил. — (Творцы науки и техники).

Данин Д. С. Нильс Бор. — М.: Мол. гвардия, 1978. — 558 с., ил. — (Жизнь замечат. людей).

Кузнецов Б. Г. Эйнштейн: Жизнь, смерть, бессмертие. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1979. — 680 с., ил.

Понтекорво Б. М., Покровский В. Н. Энрико Ферми в воспоминаниях учеников и друзей. — М.: Наука, 1972. — 159 с., ил. — (Научные биографии и мемуары ученых).

Кедров Ф. Цепная реакция идей. — М.: Знание, 1975. — 190 с., ил. — (Творцы науки и техники).

О жизни и творчестве Э. Резерфорда, П. Л. Капицы, Я. И. Френкеля, И. Е. Тамма, И. и Ф. Жолио-Кюри.

Кедров Ф. Очерки о советских физиках. — М.: Знание, 1977. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Кокин Л. М. Юность академиков: Докум. повесть. — 2-е изд., доп. — М.: Сов. Россия, 1981. — 237 с., ил.

О советских физиках — Л. А. Арцимовиче, А. Ф. Иоффе, И. В. Курчатове, Л. Д. Ландау и других.

Осиновский А. Н., Кононков А. Ф. Д. С. Рождественский. — М.: Просвещение, 1974. — 109 с., ил.— (Люди науки).

Академик Леонид Исаакович Мандельштам: Сб. статей. — М.: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

Чернощекова Т. М. А. Ф. Иоффе: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1983. — 113 с., ил.— (Люди науки).

Келер В. Р. Сергей Вавилов. — М.: Мол. гвардия, 1975. — 319 с., ил. — (Жизнь замечат. людей).

Воспоминания о Френкеле. — Л.: Наука, 1976.— 279 с., ил.

Академик Игорь Евгеньевич Тамм: Сб. статей.— М.: Знание, 1982. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Академик Игорь Васильевич Курчатов: Сб. статей. — М.: Знание, 1981. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике).

Асташенков П. Т. Подвиг академика Курчатова.— М.: Знание, 1979. — 160 с., ил. — (Творцы науки и техники).

Ливанова А. М. Л. Д. Ландау. — М.: Знание, 1978.— 192 с., ил. — (Творцы науки и техники).

Академик Лев Давыдович Ландау. — М.: Знание, 1978. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

В алфавитный указатель включены названия всех статей, выделенные жирным шрифтом, а также основные понятия и имена, встречающиеся в тексте. Они сопровождаются ссылками на соответствующие страницы книги.

А

Абрико́сов Алексей Алексеевич 237, 238
Абрикосовские вихри 237, 238
Авога́дро Амедео 9
Авогадро закон и число 9, 33, 46, 175, 297, 322
Автофазировка 290
Агрегатные состояния вещества 46, 47, 89—91, 93, 160, 207—212, 260—263
Адроны 9—12, 16, 120, 185, 224, 242, 297, 307, 327, 330,
Акустика 12—14, 181
Алиха́нов Абрам Исаакович 275
Алиханья́н Артем Исаакович 275
Альфа-распад 14, 22, 23, 26, 224, 229, 230, 283, 290, 310, 336, 338
Аморфное состояние 15, 16, 45, 90, 260, 261
Ампе́р Андре Мари 149, **316,** 339
Ампер (ед.) 316, 339
Ампера закон 316, 318
Амплитуда колебаний 231, 232, 233, 261, 298
А́ндерсон Карл Дейвид 16, 132, 145
Анизотропия 89, 152, 209, 217, 240
Аннигиляция 11, 16, 17, 19, 48, 94, 118, 119, 162, 217, 302, 306, 326, 327
Антибарионы 16, 224
Антивещество 16, 17, 162, 217, 302, 309
Антидейтроны 17
Антикварки 16, 86, 120, 121, 250, 251, 297
Антилептоны 246
Антинейтрино 85, 184, 249, 250, 251, 308, 309
Антинейтроны 16, 185
Антипротоны 16
Антистоксово излучение 148
Античастицы 16, 17, 118, 289
Антиферромагнетизм 150, 151, 152, 262
Антиэлектроны 16
Антиядра 17
Аристо́тель 77, 95, 168, 286
Ароматы частиц 11, 120, 121
Архиме́д 56, 57, 228
Архимеда закон 56, 57
Арцимо́вич Лев Андреевич 275
А́стон Фрэнсис Уильям 159, 224
Астрономия 93
Астрофизика 17—20, 131, 133, 160, 200, 211
Атмосфера 19, **20, 21,** 108, 109, 110, 129, 185, 285
Атом 9, 14, **21—26,** 34, 47, 80, 81, 85, 92, 93, 95, 109, 114, 115, 121, 123, 135, 141, 143, 146, 149, 150, 153, 154, 155, 156, 157, 159, 160, 174, 175, 202, 213, 214, 220, 236, 243, 255, 256, 257, 259, 261, 262, 293, 294, 296, 298, 299, 307, 330
Атомная физика 26—28, 69, 115, 200
Атомные электростанции (АЭС) 335, 336

Б

Барионы 9, 10, 11, 12, 16, 93, 120, 121, 185, 224, 330
Ба́сов Николай Геннадиевич 142, 155, 194
Беккере́ль Антуан Анри 228, 249
Бел 97
Бе́рнал Джон Десмонд 261
Берну́лли Даниил 59
Берну́лли Иоганн 37, 228
Бета-распад 14, 24, **29,** 70, 85, 86, 146, 183, 184, 185, 224, 230, 231, 250, 308
Биофизика 30, 31, 32
Ближний порядок 89, 261
Боголю́бов Николай Николаевич 237, 266
Бозе — Эйнштейна статистика 259
Бозоны 85, 250, 251, 331
Бойля — Мариотта закон 46, 64, 65
Бойль Роберт 64, 65
Бо́льцман Людвиг 121, **122,** 259, 332
Больцмана постоянная 122, 207, 264, 296, 332
Бор Нильс Хенрик Давид 24, **25,** 26, 70, 75, 115, 118, 166, 254, 255, 266, 296, 336
Борн Макс 254, 333
Бройль Луи де 38
Бро́ун Роберт 33
Броуновское движение 9, **33,** 80, 174, 200, 259, 297
Бу́дкер Герш Ицкович 265, **291**
Бу́нзен Роберт Вильгельм 256

В

Вави́лов Сергей Иванович 147, 187, 203, 311
Вавилова — Черенкова эффект 34, 35, 72, 265, 311
Вакуум физический 35, 36, 118, 119, 283, 288, 321
Ван-дер-Ваальса уравнение 47
Вант-Гофф Якоб Хендрик 9, 90, 91
Вариационные принципы 36, 37, 38
Ватт (ед.) 179, 340
Ве́кслер Владимир Иосифович 290
Вектор волновой 41, 42, 118, 216, 217
Вектор поляризации 82
Векторы аксиальные 177, 308
Векторы полярные 307, 308
Величины физические 247
Вероятность в физике 39
Вечный двигатель 272
Виртуальные частицы 36, 118, 119, 120, 224
Возгонка, или сублимация 111
Волновая поверхность, или фронт волны 42
Волновая функция 17, 118, 202, 257, 308, 309
Волновод 40, 41
Волновое число 41, 298
Волны 41, 42, 43, 96, 104, 105, 106, 216, 217, 218, **298,** 299
Волны де Бройля 38, 186, 221
Волчок 59, 60
Вольт (ед.) 180, 340
Во́льта Алессандро 180, **181,** 294, 340
Вращающаяся система отсчета координат 182, 183
Время 43, 44, 94, 95, 172, 189, 198, 199, 200, 201, 220, 222, 223, 247, 248, 265
Вселенная 17, 19, 67, 83, 129, 131, 133, 134, 135, 145, 160, 161, 162, 184, 185, 222, 223, 224, 267, 286, 295, 296, 301, 333
Всемирного тяготения закон 133, 222, **286**
Вуд Роберт Уильямс 284
Вычислительная физика 44, 45
Вязкость 15, **45,** 89, 90, 123, 259, 285, 297

Г

Га́бор Деннис 62
Газы 9, 39, 45, **46, 47,** 55, 56, 57, 58, 59, 64, 65, 80, 81, 95, 101, 109, 110, 111, 121, 122, 123, 188, 203, 222, 259, 268, 269, 284, 285
Газовая постоянная 46
Галактика 18, 19, 133, 134, 135, 160, 161, 248
Галиле́й Галилео 48, **68,** 69, 101, 102, 168, 182, 195, 241, 247, 248, 286, 295, 310
Гальва́ни Луиджи 181
Гамма-излучение 14, 19, 34, **47, 48,** 70, 72, 92, 93, 132, 133, 163, 164, 165, 231, 235, 256
Ган Отто 70
Гармонический осциллятор 48, 49, 126, 231, 232, 325
Ге́йзенберг Вернер 118, 253, **254**
Гей-Люсса́к Жозеф Луи 46
Гей-Люссака законы 46
Гелл-Ман Марри 120, 243
Ге́льмгольц Герман Людвиг Фердинанд 272
Генераторы электромагнитных колебаний 49, 50
Геометрическая оптика 51, 52, 53, 191, 192, 193
Геофизика 53, 54, 55
Геро́н Александрийский 36
Герц Генрих Рудольф 265, 303, 304, 321, 322, 324, 325, 339
Герц Густав 26, 27
Герц (ед.) 125, 339
Гиббс Джозайя Уила́рд 259, 268
Гиббса энергия 268
Гидроаэромеханика 44, **55—59,** 64
Гидролокатор 14
Гипероны 250
Гироскоп 59—62, 197
Гистерезиса петля 152
Глюоны 224, 242, 243, 331
Голография 62, 63, 197
Гравитационная постоянная 158, 223, 286
Гравитационное поле 85, 87, 101, 217, 286
Гравитино 331
Гравитон 331
Громкость звука 97

Гук Роберт 170, 171, 196
Гука закон 123, 173
Гюйгенс Христиан 38, 48, 101, **170,** 217

Д

Давление 64, 65, 111, 205, 259
Давление газа 46, 47, 122, 268, 297
Давление света 65—67, 311
Дальний порядок 89, 261
Дальтон Джон 46, 110, 111
Дальтона закон 46
Движение 67—69, 100, 101, 102, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 201, 227, 228, 233, 241, 281, 282, 284, 285, 286, 295, 305
Движение реактивное 101, 179, 219
Дебай Петер 123, 207, 208
Действие 171
Дейтрон, дейтон 92, 250, 280
Декарт Рене 37, 101
Деление атомных ядер 70, 306, 334, 335, 336, 337
Деление ядер спонтанное 70, 230, 280, 335
Демокрит 121
Денисюк Юрий Николаевич 62
Детекторы ядерных излучений 70, 71, 72, 128, 132, 224, 236, 333
Деформация 76, 77, 172, 173, 174, 213, 225
Децибел 97
Джозефсон Брайан 73
Джозефсона эффект 72, 73, 74, 85, 238
Джозефсоновский элемент 73, 74, 237, 238, 239, 252
Джоуль Джеймс Прескотт 227, 272, 317, 340
Джоуль (ед.) 340
Джоуля — Ленца закон 317
Диаграммы фазового равновесия и состояния 206, 207, 292
Диамагнетизм 150, 151, 237, 321
Динамика 59, 101, 102, 169, 175, 227
Дислокации 75, 76, 77, 174, 261
Диполь 74, 88, 89, 220, 241, 325, 328
Дипольный момент 74, 186, 241
Дирак Поль Адриен Морис 16, 118
Дирака уравнение 327
Дисперсия света 77, 78, 171
Дифракция 78, 79, 104, 105, 139, 191, 236
Дифракционная решетка 79, 105, 236
Диффузия 80, 81, 123, 259, 285
Диэлектрики 72, 73, **81, 82,** 165, 167, 213, 240, 260, 262, 283, 284
Диэлектрическая восприимчивость 82, 186
Диэлектрическая проницаемость 41, 82, 330
Длина 82, 83, 172, 248
Длина волны 41, 78, 217, 256, 298, 299
Домены в сегнетоэлектриках 241
Домены ферромагнитные 151
Доплера эффект 83, 164, 165, 197, 210, 256
Дополнительности принцип 253, 255
Дуализм корпускулярно-волновой 26, 106, 115, 171, 191, 216, 302
Дьюар Джеймс 188
Дюлонга и Пти закон 269

Е

Евклид 201, 222, 246, 294
Единицы измерения физических величин 84, 85, 339, 340
Единство сил природы 85—88, 120, 121, 145, 146, 185, 198, 200, 224, 242, 251, 286, 327
Емкость электрическая 340

Ж

Жидкие кристаллы 88, 89
Жидкости 45, 55, 56, 57, 58, 59, 64, 65, 80, 81, **89—91,** 95, 110, 111, 121, 123, 124, 175, 212, 213, 259, 269, 284, 285, 293, 332
Жолио-Кюри Ирен 230, 231
Жолио-Кюри Фредерик 230, 231, 306, 310
Жуковский Николай Егорович 59

З

Закон сохранения вещества 92, 93
Закон сохранения заряда 93, 145, 146, 224, 327, 336
Закон сохранения импульса (количества движения) 101, 128, 164, 169, 247, 275, 305, 306, 307
Закон сохранения энергии 93—95, 105, 114, 128, 169, 183, 188, 207, 210, 227, 228, 247, 271, 272, 275, 307, 327
Законы отражения и преломления света 52, 53, 78
Заряд электрический 16, 74, 207, 208, 316, 321, 322, 326, 327, 328, 330
Заряд ядра 28, 203, 204, 205, 280
Зарядовая четность 16, 307, 308
Зарядовое сопряжение 16, 17, 308, 309
Звук 12, 13, 14, 40, 41, 63, 83, **95—97,** 225, 285
Зельдович Яков Борисович 186, 307
Зоммерфельд Арнольд 25, 26, 254
Зонная теория 166, 216, 222, 261, 262

И

Излучение электромагнитное 19, 47, 74, 106, 141, 142, 143, 146, 147, 148, 155, 156, 157, 197, 235, 322—326
Изобары 338
Изоляторы 221, 222
Изомерия атомных ядер 335
Изотопы 92, **98—100,** 159, 160, 162, 224, 229, 230, 231, 274, 279, 280, 306, 307, 337, 338
Изотропия 89, 246
Импульс механический 100, 101
Инвариантность 200, 246
Индуктивность 320, 340
Инерция 68, 69, **101—104,** 226, 228, 241, 276, 285, 286
Интерференция 34, 63, 79, **104—106,** 191
Инфракрасное излучение 106, 107, 256, 322
Ионизация 151, 211, 222, 235, 312
Ионная связь 82, 139
Ионосфера 108—110, 211
Ионы 21, 28, 109, 110, 146, 159, 175, 207, 221, 222, 225, 261, 280, 312, 322
Иоффе Абрам Федорович 213, **311,** 335
Ирншоу теорема 220
Искусственные спутники Земли 108, 128, 129
Испарение 110, 111, 123, 267, 268, 271, 292, 332

К

Калория 340
Камерлинг-Оннес Хейке 188, 238
Кандела (ед.) 299, 339
Каоны 10
Капица Петр Леонидович 24, 239, 296, 297
Карно Никола Леонар Сади 112, 272
Карно цикл **112—114,** 263, 272
Квазичастицы 75, **114,** 261, 298
Квант 47, 48, 114, 115, 118, 146, 155, 156, 163, 164, 165, 191, 201, 216, 218, 235, 262, 296, 297, 301, 302, 306, 326
Квантование 238
Квантовая механика 14, 25, 26, 35, 39, 44, 89, **114—118,** 166, 172, 184, 188, 193, 216, 221, 237, 254, 255, 257, 262, 267, 269, 282, 288, 297, 307, 308, 331, 333
Квантовая система 114
Квантовая статистика 259
Квантовая хромодинамика 243
Квантовая электродинамика 118—120, 200, 217, 254, 302, 327
Квантовая электроника 157, 200
Квантовое число 10, 16, 24, 25, 26, 202, 307
Квантовый переход 24, 25
Кварки 10, 11, 16, 36, 85, 86, **120, 121,** 146, 185, 224, 242, 243, 250, 251, 297, 330, 331
Кеезом Виллем Хендрик 296, 297
Кеплер Иоганн 65, 66, 67, 137, 170, 241, 286
Кинематика 168, 169
Кинетическая теория 45, 47, 64, 75, **121—123,** 219, 259, 264, 267, 268, 319
Кинетическая энергия 93, 94, 95, 96, 183, 207, 253, 255, 297, 303, 334
Кипение 110, 111, **123, 124**
Кирхгоф Густав Роберт 59, 181, 256
Клапейрон Бенуа Поль Эмиль 46, 113
Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль 121, 122, 272, 331
Клапейрона — Клаузиуса уравнение 292
Ковалентная связь 81, 82, 139
Кокрофт Джон Дуглас 283
Колебания 49, 104, 105, 106, **124—127,** 208, 209, 210, 298, 299
Комптон Артур Холли 128, 302

Комптона эффект 36, 119, **128,** 302
Комптоновская длина волны 128
Конвекция 269, 270
Конденсатор 207, 241
Конденсация 111, 267, 271
Копе́рник Николай 69, 101, 180
Кориоли́с Гюстав Гаспар 183
Кориолиса сила 183
Космические исследования 128—131
Космические лучи 16, 87, 121, **132—133,** 185, 290, 331
Космология 133—135, 200, 201, 211
Коэрцитивная сила 152
Криоэлектроника 74, 238
Кристаллизация 292
Кристаллическая решетка 123, 135, 136, 137, 138, 139, 174, 221, 232, 237, 261
Кристаллические системы 136, 137
Кристаллография 138
Кристаллофизика 79, **136—139,** 175, 235
Кристаллы 75, 76, 77, 81, 82, 89, 136—139, 217, 218, 220, 225, 240, 241, 260, 261
Критическая температура 293
Критическое давление 293
Кружки юных физиков 139, 140
Кулóн Шарль Огюстен 328, **329**
Кулон (ед.) 326
Кулона закон 207, 219, 237, 283, 328, 329, 330
Ку́пер Леон 237
Куперовские пары 36, 237
Курча́тов Игорь Васильевич 240, 275, **335**
Кюри́ Пьер 228, **229,** 230, 280, 294
Кюри закон 239
Кюри точка 229, 241, 294

Л

Лавуазье́ Антуан Лоран 92
Лагра́нж Жозеф Луи 38, 55, 169, 170, 171
Лазер 105, **141—143,** 144, 186, 194, 196, 197, 211, 256, 257, 301, 311, 326
Лазерная технология 143—145, 194
Ламинарное течение 45, 284, 285
Ланда́у Лев Давыдович 25, 114, 210, 237, 239, **266,** 270, 297, 309
Ланжевéн Поль 151
Лауэграмма 79
Ле́бедев Петр Николаевич 66, 311
Ле́венгук Антони ван 196
Ленц Эмилий Христианович 181, **317**
Ленца правило 237, 248, 317, 320
Леона́рдо да Ви́нчи 51, 57
Лептоны 16, 85, 86, **145, 146,** 183, 184, 246, 251, 326, 331
Линза 195, 196
Литосфера 54, 55
Лобаче́вский Николай Иванович 201, 294, 295
Ломоно́сов Михаил Васильевич 92, 93
Ло́ренц Хендрик Антон 247
Лоренца сила 316, 317, 318
Лучепреломление двойное 89, 170
Люкс (ед.) 299
Люмен (ед.) 299
Люминесценция 146—148, 302
Люминофоры 71, 72, 146, 148
Ляпуно́в Александр Михайлович 59

М

Магнетизм 149—153, 229, 262, 292, 294
Магнетон Бора 327
Магнитная восприимчивость 149, 229
Магнитная постоянная 320
Магнитная проницаемость 41, 149
Магнитное насыщение 151
Магнитное поле 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 159, 160, 186, 197, 209, 210, 216, 217, 218, 237, 238, 248, 249, 253, 256, 257, 275, 277, 278, 288, 302, 304, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321
Магнитный момент 149, 150, 151, 152, **153, 154,** 188, 262, 294, 329
Магнитный момент электрона 28, 120, 150, 327
Магнитострикция 97, 153
Магнитосфера 154, 155
Магнон 114
Мазер 155—157, 326
Ма́йер Юлиус Роберт 94, 272
Ма́йкельсон Альберт Абрахам 158
Майкельсона опыт 157—158, 198
Ма́ксвелл Джеймс Клерк 39, 59, 65, 66, 121, 122, 191, 259, 264, 265, **318,** 319, 321, 322, 323
Максвелла уравнения 318, 319, 320, 322, 325
Мандельшта́м Леонид Исаакович 194
Марио́тт Эдм 64, 65
Масса 9, 16, 92, 93, 100, 101, 145, **158, 159,** 160, 172, 182, 183, 255, 267, 268, 286, 295, 305
Масса покоя 29, 159, 184, 200, 301, 302
Масс-спектрометрия 159, 160
Материя 16, 86, 92, 93, **160—162,** 222, 223, 236, 310
Маятники 125, 126, 166, 176, 232
Маятник Фуко́ 182
МГД-генератор 162, 163, 212
Мезоатомы 28
Мезоны 9, 10, 11, 12, 16, 120, 121, 243, 308, 309, 330
Мейснера эффект 237, 249
Менделе́ев Дмитрий Иванович 46, **203,** 216, 228, 280
Мёссбауэр Рудольф Людвиг 164
Мёссбауэра эффект 159, **163—165,** 201
Металлическая связь 139
Металлы 81, 135, 137, **165—167,** 172, 175, 181, 221, 222, 237, 259, 260, 262, 267, 268, 269, 283, 284
Метрология 203, 297
Механика 36, 37, 38, **167—172,** 198, 199, 201, 216, 222, 227, 228, 233, 234, 282, 295
Механические свойства материалов 172—174
Микроэлектроника 143, 144
Ми́лликен Роберт Эндрус 326
Моделирование 44, 45
Модуляция электромагнитных волн 326
Молекула 9, 88, 89, 90, 91, 109, 111, 114, 121, 122, 123, 146, 149, 155, 156, 157, **174, 175,** 212, 220, 256, 257, 259, 297
Моль 9
Момент инерции 175, 176, 177
Момент количества движения 177, 257, 308
Момент силы 176, 227
Монокристаллы 137, 205, 213
Мопертюи́ Пьер Луи 37, 38
Мощность 177, 178, 179
Мюоны 16, 85, 132, 145, 146, 250, 331

Н

Наименьшего действия принцип 36, 37, 38, 170
Намагниченность остаточная 152
Напряжение механическое 172
Напряжение электрическое 180, 181, 221, 311
Напряженность магнитного поля 149
Напряженность электрического поля 186, 248, 313, 316, 328
Невесомость 295
Неинерциальные системы отсчета 180—183, 200, 201
Нейтринная астрономия 19, 185
Нейтринная физика 185
Нейтринное излучение 185
Нейтринный телескоп 185
Нейтрино 16, 19, 29, 94, 132, 133, 145, 146, 162, **183—185,** 224, 249, 250, 251, 308, 310
Нейтрон 9, 10, 14, 23, 29, 72, 85, 92, 93, 94, 133, 139, 146, 150, **185, 186,** 224, 229, 231, 236, 240, 242, 243, 249, 250, 251, 257, 279, 280, 306, 330, 333—336, 337, 338
Нейтронная физика 333
Нелинейная оптика 186, 187
Низкие температуры 114, **187, 188,** 237, 238, 261
Нуклоны 85, 92, 93, 121, 160, 242, 243, 257, 330, 333, 334, 336, 338
Ньютон Исаак 48, 57, 59, 66, 77, 78, 102, 103, 105, 106, 115, 158, 159, 168, **170, 171,** 182, 191, 195, 198, 200, 201, 217, 218, 222, 233, 234, 241, 242, 248, 267, 310, 339
Ньютон (ед.) 339
Ньютона законы механики 48, 100, 102, 103, 158, 176, 182, 227, 233, 234, 242, 286, 305

О

Обменное взаимодействие 152
Одновременность 83, **189,** 200
Океан 40, 55
Олимпиады физические 189, 190, 191
Ом Георг Симон 181, 340
Ом (ед.) 181, 340
Ома закон 181
Оптика 36, 37, 38, 40, 170, 171, 186, 187, **191—194,** 299, 300, 301

Оптические приборы 53, 79, 191, **195—198**
Осмотическое давление 91
Оси оптические 88, 89, 217
Относительности принцип 69, 101
Относительности теория 35, 82, 88, 115, 118, 158, 159, 165, 172, 189, 193, **198—201,** 217, 220, 222, 233, 265, 267, 286, 331
Очарование частиц 11, 12

П

Пар 110, 111, 121, 123, 124, 267, 268, 293, 332
Парамагнетизм 149, 150, 151, 188, 229, 292, 294, 321
Парсек 33, 161, 223
Паскáль Блез 46, 65, 340
Паскаль (ед.) 56, 57, 65, 172, 340
Паскаля закон 56, 57
Пáули Вольфганг 29, 118, 183, 202
Паули принцип 26, 166, 167, **202,** 237, 259, 262
Период колебаний 124, 125
Период полураспада 14, 280
Периодическая система химических элементов 22, 26, **203—205,** 216, 224, 228, 230, 279, 280
Периодический закон химических элементов 203, 204
Перрéн Жан Батист 33, 174
Петрóв Василий Владимирович 312
Пионы 132, 133
Плавление 205, 206, 207, 271, 292, 332
Плазма 44, 154, 155, **207—212,** 252, 253, 274, 275, 276, 277, 278
Плазмон 114
Планк Макс Карл Эрнст Людвиг 38, 84, 85, 114, **115,** 296, 301, 302
Планка постоянная 24, 38, 47, 114, 115, 255, 257, 296, 302, 326, 327
Пластичность 77, 173, 174
Платó опыт 90, **212**
Плотность жидкостей и газов 9, 89, 287
Плотность материи 161, 162
Поверхностно-активные вещества 212
Поверхностное натяжение 70, 89, 90, 211, **212, 213,** 338
Позитрон 16, 94, 118, 119, 120, 132, 224, 230, 231, 302
Поликристаллы 138, 205
Полупроводники 165, 211, **213—216,** 221, 222, 260, 262, 278, 279
Поля и частицы 216, 217
Поляризатор оптический 218
Поляризация вакуума 36, 118, 119, 327
Поляризация волн 186, 187, 298, 326
Поляризация диэлектриков 81, 82, 240, 241
Поляризация света 89, 191, **217, 218, 219**
Померанчýк Исаак Яковлевич 267
Понтекóрво Бруно Максимович 232, 337
Попóв Александр Степанович 110, 125, **323,** 324, 325
Порог слышимости 96, 97
Потенциал ионизации 207, 208
Потенциал электрический 210
Потенциальная энергия 93, 94, 139, **219, 220,** 228, 242, 255, 282, 283
Потенциальный барьер 282, 283, 284
Правило буравчика 248, 308
Правило левой руки 317
Прелесть частиц 12
Прецессия 61, 62
Призма 105, 106, 196
Причинности принцип 189, **220**
Проводимость 216, **221, 222**
Проводники 81, 82, 221, 222, 248, 249, 317, 318, 329
Пространство 100, 134, 198, 200, 201, **222, 223, 224,** 247, 296, 307, 309
Протон 9, 10, 14, 16, 24, 29, 72, 85, 86, 87, 92, 93, 133, 150, 184, 185, 210, **224, 225,** 229, 231, 236, 240, 242, 243, 249, 250, 251, 252, 257, 280, 283, 288, 289, 290, 291, 292, 301, 330, 333, 336, 337, 338
Прóхоров Александр Михайлович 142, 155, 194
Птолемéй Клавдий 69, 101, 180
Пьезоэлектричество 82, 96, 97, 225

Р

Работа 113, 114, 177, 178, 179, 219, 220, **226, 227,** 270, 271, 272
Работа выхода 304
Равновесие механической системы 227, 228
Равнодействующая системы сил 89, 212, 242
Радиоастрономия 18, 19
Радиоактивность 14, 24, 39, 94, **228—231,** 246, 249, 333, 335, 338
Радиоволны 108, 110, 322
Радиоизлучение космическое 18, 19
Радиометрический эффект 66
Радиосвязь 323
Радиотелескоп 18
Радуга 77, 78
Расширение Вселенной 134, 135, 161, 162
Реверберация 12
Рéзерфорд Эрнест 14, 22, 23, **24,** 26, 71, 224, 242, 287, 310, 330, 336, 338
Резерфорда опыт 22, 23, 330, 338
Резонанс 231, 232, 233
Резонансные частицы 210
Рéйнольдс Осборн 285
Рейнольдса число 285
Рекомбинация 109, 135
Релаксация 123
Реликтовое излучение 19, 135, 162, 248, 301
Релятивистская механика 198, 200, **233, 234,** 257, 295
Рентгéн Вильгельм Конрад 213, 234, **235**
Рентгеновские лучи 15, 19, 79, 128, 139, 213, 222, **234, 235, 236,** 275, 302, 322
Рождéственский Дмитрий Сергеевич 191
Ряд напряжений 181

С

Самодиффузия 80
Самоиндукция 320
Сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника 249
Сверхпроводимость 72, 73, 150, 188, 221, **237—239,** 240, 262, 267, 292
Сверхтекучесть 188, 237, **239, 240,** 270, 292, 296, 297, 311
Свет 17, 40, 44, 51, 52, 53, 65, 66, 67, 77, 78, 83, 94, 95, 115, 141, 142, 143, 146, 147, 148, 157, 158, 170, 171, 186, 187, 191, 192, 193, 194, 200, 201, 216, 217, 218, 219, 286, 295, 296, 297, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 322, 323, 324, 325, 326
Световой год 161, 223
Сегнетоэлектрики 240, 241, 335
Сейсмология 53
Семёнов Николай Николаевич 306
СИ — система единиц (Система Интернациональная) — 65, 85, **239, 240**
Сила 103, 158, 226, 227, 228, 241, 242, 267, 305
Сила звука 96, 97
Сила инерции 182, 183, 285, 295
Сила света 299
Сила тока 181, 318
Сила трения 219, 220, 226, 227, 281, 282
Сила тяжести 182, 219, 286, 295, 305
Силовые линии 209, 248, 320, 328
Сильные взаимодействия 10, 16, 17, 85, 133, 198, 224, **242, 243,** 251, 258, 283, 297, 308, 309, 331, 338
Сименс (ед.) 222
Симметрия законов природы 202, **243—247,** 257, 258, 259, 267, 307
Симметрия кристаллов 137, 138
Система отсчета 82, 220, 227, 248, 305
Скин-эффект 248, 249
Склодóвская-Кюрú Мария 228, **229,** 230, 280
Скобельцы́н Дмитрий Владимирович 132
Скорость звука 13, 287
Скорость света 65, 66, 83, 158, 159, 216, 223, 233, 234, 247, 302, 303, 304, 321, 324
Скорость угловая вращения 175, 176
Слабые взаимодействия 16, 85, 87, 132, 145, 184, 198, 224, 246, **249—251,** 258, 327, 331
Смолухóвский Мариан 80
Сóдди Фредерик 159, 224, 230
Солитон 43, **251, 252**
Солнечная постоянная 302
Солнечный ветер 20, **252, 253**
Соотношение неопределенностей 35, 118, 243, **253—255,** 302
Спектроскопия 133, 191, **256, 257**
Спин 9, 10, 16, 118, 120, 145, 150, 184, 185, 202, 224, 237, 240,

243, 255, **257**, 259, 294, 301, 308, 327, 330, 331
Сплавы 172, 175, 205, 206, 207, 237
Спонтанное нарушение симметрии 257, 258, 259
Статика 168, 228
Статистическая физика 39, 200, **259**, 296
Стокс Джордж Габриель 59, 148
Стокса закон 59
Столе́тов Александр Григорьевич 303, **304**, 311
Странность частиц 10
Сци́лард Лео 306

Т

Тамм Игорь Евгеньевич 34, 35, **265**, 266
Та́унс Чарлз 142, 155, 194
Твердое тело 77, 80, 81, 89, 96, 111, 114, 123, 175, 177, 213, 227, 259, **260—263**, 269, 281, 285, 298, **299**, 303, 332
Текучесть 45, 65, 123
Температура 45, 80, 81, 110, 111, 112, 113, 114, 123, 124, 187, 188, 205, 206, 207, 212, 240, 241, **263—264**, 267, 268, 269, 297
Температурная шкала 188, 263
Теоретическая физика 133, **264—267**, 294, 310
Тепловая машина 112, 113, 114, 121, 272
Тепловое движение 47, 69, 80, 93, 123, 261, 264
Тепловое равновесие 110, 111, 121, 123, 207, **267**, **268**, 269, 332
Теплоемкость 123, 260, **268**, **269**, 292
Теплопроводность 123, **269**, **270**, 296, 297
Теплота испарения 111
Теплота плавления 205
Термодинамика 112, 113, 114, 121, 122, 187, 267, 268, **270—272**, 331, 332
Термодинамики законы 113, 114, 122, 123, 267, 268, 269, 271, 272, 331
Термосфера 21
Термоядерный синтез 19, 162, 210, 212, 238, **272—276**, 277, 278, 314, 336, 337
Токамак 275, 276, **277**, **278**
То́мсон Джозеф Джон 22, 145
То́мсон Уильям (лорд Кельвин) 59, 263, 272
Тон и тембр звука 97
Тонкой структуры постоянная 327
Торриче́лли Эванджелиста 46
Транзистор 278, 279
Трансурановые элементы 229, **279**, **280**
Трение 45, 239, 241, **281**, **282**
Тройная точка 292
Тропосфера 21
Туннельный эффект 14, 73, 74, **282**, **283**, **284**
Турбулентность 96, 196, **284—285**
Тяготение 36, 93, 95, 157, 158, 170, 171, 186, 198, 200, 201, 217, 219, 267, **286**, 295

У

Уа́тт Джеймс 340
Ударная волна 287
Ультразвук 12, 13, 14, 63, 95, 96, 97, 151, 225
Ультрафиолетовое излучение 19, 21, 222, 235, 303
Умов Николай Алексеевич 96, 173
Умова опыт 173
Уо́лтон Эрнест Томас Синтон 283
Упругость 173
Уран 14, 24, 34, 99, 228, 279, 280, 306, 307, 334, 335, 336, 338
Ускорение 69, 158, 182, 241, 295, 325
Ускорители заряженных частиц 14, 86, 121, 160, 234, 273, **287—292**, 310, 327, 331

Ф

Фаза волны 41
Фаза колебания 104, 105, 106, 125
Фаза термодинамическая 292, 293, 294
Фазовое равновесие 292
Фазовые превращения 268, **292**, **293**, **294**
Фарадей Майкл 150, 162, 293, 318, **321**, 322, 340
Фарадея законы 321, 322
Фе́йнман Ричард Филлипс 118
Ферма́ Пьер 36, 37, 38, 51, 52, 191
Ферма принцип 36, 38, 51, 52
Фе́рми Энрико 29, 118, 183, 249, 250, 265, 279, 280, **337**
Ферми — Дирака статистика 259
Ферми поверхность 167
Ферми энергия 166, 167, 202
Ферримагнетизм 150, 153
Ферромагнетизм 75, 97, 138, 150, 151, 152, 241, 262, 292, 294
Фёдоров Евграф Степанович 137, 138
Физика и математика 294, 295
Физические парадоксы 295, 296, 297
Флёров Георгий Николаевич 70, 230, 280, 335
Флуктуации 35, 268, 284, **297**
Флуоресценция 147
Фок Владимир Александрович 119, 266
Фонон 114, 261, **298**, **299**
Фосфоресценция 147
Фотометрия 299, 300, 301
Фотон 16, 17, 66, 115, 118, 120, 141, 142, 143, 159, 184, 185, 191, 192, 200, 216, 217, 242, 243, 254, 298, **301—303**, 304, 331
Фототранзистор 215
Фотоэлементы 304
Фотоэффект 115, 128, 191, 200, 213, 302, **303—305**, 311
Франк Джеймс 26, 27
Франка — Герца опыт 26, 27
Франк Илья Михайлович 34, 35
Френе́ль Огюстен Жан 79, 191
Френкель Яков Ильич 75, 123, 267
Фри́дман Александр Александрович 133
Фуко́ Жан Бернар Леон 182, 248
Фуко токи (вихревые токи) 237

Х

Харито́н Юлий Борисович 24, 307
Хемилюминесценция 148
Химическая связь 81, 82, 139, 175
Хи́ншелвуд Сирил Норман 306
Хла́дни Эрнст Флоренс Фридрих 106
Хладни фигуры 106
Холл Эдвин Герберт 85
Холла эффект 85
Хохло́в Рем Викторович 187

Ц

Центр масс 88, **305**, **306**
Центробежная сила 182, 183
Цепные реакции 123, **306**, **307**, 334, 335
Циолко́вский Константин Эдуардович 101
Цуги 105

Ч

Чаплы́гин Сергей Алексеевич 59
Частота колебаний 125, 126, 298, 299, 326
Че́двик Джеймс 24, 183, 185, 338
Черенко́в Павел Алексеевич 34, 35
Черные дыры 19, 223, 286
Четность 307, 308, 309

Ш

Шарля закон 46, 64
Шрёдингер Эрвин 38, **118**
Шрёдингера уравнение 118, 255
Штерна — Герлаха опыт 26, 27, 28, 257

Э

Эвтектика 206, 207
ЭДС индукции 248, 249, 318, 319, 320
Э́йлер Леонард 38, 55, 59, 168
Эйнште́йн Альберт 33, 80, 87, 93, 115, 118, 123, 128, 133, 134, 141, 159, 191, 198, **200**, 201, 222, 224, 247, 248, 255, 265, 272, 280, 295, 297, 302, 304
Эйнштейна закон 200
Экзосфера 21
Экситоны 75
Экспериментальная физика 18, 39, 133, 224, 264, 267, **310**, **311**
Экспоненциальный закон 243, 283, 296
Электрическая дуга 312
Электрическая постоянная 318
Электрический разряд в газах 209, 234, 304, **311—315**
Электрический ток 165, 166, 180, 181, 213, 214, 221, 222, 237, 248, 249, 312, 315, 316, 317, 318, 321
Электрическое поле 159, 207, 208, 210, 215, 216, 217, 218, 221, 222, 240, 241, 288, 289, 302,

315, 316, 320, 321, 328, 329, 330
Электрическое сопротивление 181, 222, 340
Электродинамика 69, 198, 235, 247, 258, 295, 302, **316—321**
Электролиз 321, 322
Электролиты 222, 321, 322
Электромагнитное поле 101, 118, 210, 216, 217, 242, 243, 296, 301, 316, 318, 319, 321, 322
Электромагнитные взаимодействия 85, 87, 133, 145, 302, 308, 309
Электромагнитные волны 17, 34, 92, 106, 110, 155, 157, 191, 216, 219, 235, 285, 302, **322—326**
Электрон 10, 11, 14, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 34, 35, 85, 92, 94, 108, 109, 110, 114, 115, 118, 119, 120, 132, 145, 146, 147, 150, 152, 153, 154, 160, 165, 166, 167, 183, 202, 207, 208, 210, 213—216, 217, 221, 229, 235, 236, 237, 240, 246, 249—251, 252, 253—255, 257—259, 260, 262, 267, 282—284, 288, 290, 291, 296, 303, 308, 309, 313, 325, 338, **326—327,** 330
Электроника 213
Электронные вычислительные машины 40, 44, 45, 72, 197, 239, 311, 330
Электронный микроскоп 79, 288
Электропроводность 41, 165, 166, 213, 214, 221, 222, 260, 278
Электрослабых сил теория 85, 258
Электростатика 316, **327—330**
Элементарные частицы 85—88, 150, 246, 257, 267, 307, **330—331,** 337
Энергия 93—95, 145, 166, 219, 220, 223, 227, 268, 269, 271, 272, 273, 285, 296, 297, 301, 305, 334, 335
Энергия активации 123
Энергия покоя 159, 200, 234
Энергия связи 29, 333, 334
Энергия частицы 14, 24, 29, 114, 115, 167, 299, 302
Энтропия 272, **331, 332**
Эренфест Пауль 292

Ю

Юка́ва Хидэки 145, 243
Юнг Томас 79, 104, 191

Я

Ядерная физика 28, 69, 132, 200, 242, 280, **333,** 337
Ядерная энергетика 70, 200, 280, **333—336**
Ядерное горючее 274, 335, 336
Ядерные реакторы 230, 307, 334, 335, 336
Ядерные реакции 135, 184, 185, 230, 231, 272—276, 306, 307, 333, 334, 335, **336, 337**
Ядро атомное 14, 23, 26, 29, 47, 70, 75, 85, 92, 132, 133, 135, 160, 163, 164, 174, 185, 194, 196, 224, 242, 243, 249, 250, 257, 272, 273, 283, 330, 333, 336, **338**
Яко́би Борис Семенович 181, 317
Яркость 300, 340

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

А ампер
Å ангстрем
а. е. астрономическая единица
ат, атм атмосфера
в. век
вв. века
В вольт
Вб вебер (единица магнитного потока)
Вт ватт
г. год
гг. годы
г грамм
ГПа гигапаскаль (10^9 Па)
г/см^3 грамм на кубический сантиметр
Гц герц
Гс гаусс (единица магнитной индукции)
ГэВ гигаэлектронвольт (10^9 эВ)
Дж джоуль
Дж/моль
до н. э. до нашей эры
и др. и другие
и т. д. и так далее
и т. п. и тому подобное
кал калория
кВт киловатт
кВт/ч киловатт-час
кг килограмм
кг/м^3 килограмм на кубический метр
кГц килогерц
кДж килоджоуль
Кд кандела
ккал килокалория
Кл кулон
км километр
км/с километр в секунду
км/ч километр в час
КПД коэффициент полезного действия
Кпс килопарсек
Л. Ленинград (в библиографическом указателе)
лк люкс
лм люмен
М. Москва (в библиографическом указателе)
м метр
м^2 квадратный метр
м^3 кубический метр
м/с метр в секунду
м/с^2 метр на секунду в квадрате
м/ч метр в час
мин минута
мкм микрометр
млн. миллион
млрд. миллиард
мм миллиметр
мм рт. ст. миллиметр ртутного столба
МПа мегапаскаль (10^6 Па)
Мпс мегапарсек (10^6 пс)
МэВ мегаэлектронвольт (миллион электронвольт)
МэВ/с мегаэлектронвольт в секунду
Н ньютон
нм нанометр
Ом·м ом-метр
Ом·см ом-сантиметр
Па паскаль
пс парсек
рис. рисунок
с скорость света
с секунда
с. страница
СИ Система Интернациональная
см. смотри
см сантиметр
см^2 квадратный сантиметр
см^3 кубический сантиметр
сут сутки
Тл тесла
т тонна
т. е. то есть
трлн. триллион
тыс. тысяча
Ф фарада
ч час
эВ электронвольт
ЭВМ электронные вычислительные машины
ЭДС электродвижущая сила
° С градус Цельсия
К кельвин

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ЮНОГО ФИЗИКА

Составитель
ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ЧУЯНОВ

Заведующий редакцией
КИРЬЯНОВ В. Ю.

Ведущий редактор
МИНИНА Т. П.

Редактор
ОФИТОВ Н. В.

Редакторы-картографы
ЛЕБЕДЕВА Е. Н.
КОВАЛЕВА А. В.

Специальные редакторы:
КРАЙНОВ В. П.
ЛАНДСБЕРГ Л. Г.
ТАРАСОВ Л. В.

Контрольный редактор
ПУТВИНСКИЙ С. В.

Художественный редактор
ХРАМОВ В. П.

Технический редактор
ИВАНОВА Т. Г.

Корректор
РЕЙБЕКЕЛЬ В. Н.

Авторы статей:
АНИСИМОВ С. И.
АСЛАМАЗОВ Л. Г.
БЕЛЯЕВ С. Т.
БОКШТЕЙН Б. С.
БОРОВОЙ А. А.
БЯЛКО А. В.
ВАРЛАМОВ А. А.
ГРАБИЛЕНКОВ М. В.
ДАНИЛЫЧЕВ В. А.
ЖДАНОВ Г. Б.
ЗАЙМОВСКИЙ В. А.
ЗИГУНЕНКО С. Н.
КАЛМАНСОН А. Э.
КИРИЛЛОВА И. Г.
КОЛЕСНИКОВ Ю. В.
КУЗНЕЦОВ В. И.
КУЛИКОВА Е. В.
ЛЕШКОВЦЕВ В. А.
ЛИЛЕЕВ А. С.
МАРОЧНИК Л. С.
МИГДАЛ А. А.
МИГДАЛ А. Б.
НОВИКОВ И. Д.
ОРЛОВ В. А.
ОРЛОВ В. В.
ПИКИН С. А.
ПУТВИНСКИЙ С. В.
СМИЛГА В. П.
СМОНДЫРЕВ М. А.
СМОРОДИНСКИЙ Я. А.
СПИРИДОНОВ А. А.
ТАРАСОВ Л. В.
ТРИФОНОВ Д. Н.
ФАБРИКАНТ В. А.
ФЕДОТОВ Я. А.
ФОМИН Б. В.
ЧУЯНОВ В. А.
ЯВЕЛОВ Б. Е.

Принципиальный макет издания художника
ЮЛИКОВА А. М.

Оформление издания художника
КОМАРОВА В. С.

Макет книги художника
ВАРГИНА В. П.

Иллюстрации выполнили художники:
АРАТОВСКИЙ Ю. М.
БИГМУХАМЕТОВА Р. Г.
БУХАРЕВ В. П.
ВАРГИН В. П.
КАМЕНЩИКОВ Д. Б.
КОГАН Е. А.
ЛОБАНОВА И. Г.
ЛУХИН С. Ф.
ПОБЕДИНА М. В.
РАДАЕВ В. Д.
СЕМАКОВ А. Б.
СИНЕГУБОВ А. И.
СОКОВИН В. Б.
СОРОКА Т. П.
ШМЕЛЕВ О. М.

Фотоиллюстрации выполнили:
БОБРОВ Н. И.
БОЧКОВ М. Н.
КЛЮЕВ А. В.

Использованы материалы фотохроники ТАСС

Библиотечная серия

НБ № 797.
Сдано в набор 15.11.83. Подписано в печать 20.08.84. А11080. Формат 70×108 1/16. Бумага мелованная (ТУ81-11-03-77). Печать офсетная. Гарнитура литературная. Усл. печ. л. 30,80+0,35 форзац. Уч.-изд. л. 42,21. Усл. кр.-отт. 127,92. Тираж 500 000 экз. (3-й завод 300 001—400 000 экз.) Заказ 2910. Цена 3 р. 60 к. В суперобложке 3 р. 70 к.

Издательство «Педагогика» Академии педагогических наук СССР и Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, 107847, Лефортовский пер., 8
Редакция энциклопедических словарей и справочников для детей и юношества
Москва, 107082, Бакунинская ул., 55

Карта на вклейке подготовлена к печати ПКО «Картография», отпечатана фабрикой № 5 ГУГК.

Набрано во 2-й типографии издательства «Наука».
121099, Москва, Шубинский пер., 10

Отпечатано с пленок на Калининском полиграфкомбинате Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
г. Калинин, проспект Ленина, 5.